

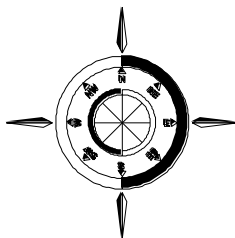
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"

АВТОМАТИЗАЦІЯ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Науково-технічний збірник

ВИПУСК 29



Одеса
2024

УДК 681.5:629.12(045)

A22 Автоматизація суднових технічних засобів: науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – 136 с.

Збірник присвячений проблемам розрахунку, проектування і експлуатації суднових автоматизованих технічних засобів. Узагальнено досвід експлуатації і наведені результати досліджень суднових систем автоматичного управління і регулювання.

Для науковців і спеціалістів.

Затверджено до друку вченою радою Національного університету "Одеська морська академія" 28.11.2024, протокол № 3.

Редакційна колегія: д.т.н., проф. С. І. Горб (науковий редактор); к.т.н., доц. А. К. Сандлер (відповідальний секретар); д.т.н., доц. В. В. Будашко; д.т.н., проф. Л. Л. Вагущенко; д.т.н., проф. В. А. Голіков; д.т.н., проф. М. В. Міюсов; д.т.н., проф. В. В. Нікольський; д.т.н., проф. О. А. Оніщенко; д.т.н., проф. С. В. Сагін; д.т.н., проф. П. С. Суворов; Prof., Dr.-Ing.Reinhard Langmann.

Адреса редакційної колегії: 65052, г. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, Національний університет "Одеська морська академія" (НУОМА), кафедра ТАУ та ОТ. Тел./факс (048) 793-24-75 E-mail: gs@fa.onma.edu.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію: серія КВ, № 15286-38588.

Включено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886.

Індексується у науково-метричній базі даних Index Copernicus.

ISSN 1819-3293 (Print)

ISSN 2415-3915 (Online)

© Національний університет "Одеська морська академія"

УДК 681.518.5:681.586.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-03-12

ARTICLE HISTORY

Received 18.09.2024

Accepted 25.09.2024

Богач Валентин Михайлович¹, Опришко Марина Олегівна²
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
valent57bog@gmail.com¹, marinaoprisko67@gmail.com²

Вдосконалення автоматизованого засобу контролю процесу мащення циліндрових втулок

Bogach Valentin¹, Opryshko Marina²
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
valent57bog@gmail.com¹, marinaoprisko67@gmail.com²

Improvement of the automated means of controlling the lubrication process of cylinder bushes

Резюме. Обґрунтовано схемотехнічне рішення пристрою контролю мащення поверхонь деталей циліндро-поршневої групи суднових двигунів внутрішнього згоряння. У запропонованому пристрої забезпечена більш адекватне визначення зміни режимів мащення та перетворення параметрів плівки мастила у зміни інформаційного сигналу, а також компенсація впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал пристрою.

Summary. The schematic and technical solution of the device for controlling the lubrication of the surfaces of parts of the cylinder-piston group of internal combustion marine engines is substantiated. The proposed device provides a more adequate determination of the change in lubrication modes and the transformation of the parameters of the lubricant film into changes in the information signal, as well as compensation for the influence of destabilizing factors on the measuring channel of the device.

Безперервне підвищення потужності суднових двигунів внутрішнього згоряння (СДВЗ) і подальше використання важких та

надважких сортів палива обумовили тенденцію зниження надійності найбільш важливих деталей і вузлів двигунів. Серед вузлів СДВЗ, чия надійність викликає найбільшу занепокоєність, лідируюче місце належить деталям циліндро-поршневої групи (ЦПГ). Аналіз статистичних даних щодо надійності сучасних СДВЗ показує, що ресурс втулки циліндра становить орієнтовно $3 \dots 4 \cdot 10^3$, головки поршня – $2 \dots 3 \cdot 10^3$, кришки – $3,5 \dots 4,5 \cdot 10^3$ годин. При чому спостерігається число раптових відмов, які швидко розвиваються, та визначення яких неможливо без новітніх засобів та методів технічного діагностування. У цілому, за останнє десятиріччя характеризується зниженням фактичного ресурсу деталей ЦПГ майже у 1,5 рази. Як наслідок, – загальне збільшення вартості експлуатації й трудомісткості технічного обслуговування та ремонту СДВЗ. Таким чином, розробка ефективних засобів визначення реального технічного стану СДВЗ є актуальним завданням сучасного етапу експлуатації суднових енергетичних установок і дизелебудування.

Вірогідна інформація про реальний технічний стан СДВЗ, а саме – інформація про наявність зношування деталей ЦПГ, дає змогу впливати на його інтенсивність і, таким чином, управляти їм, а, отже, управляти технічним станом двигуна в цілому [1 - 3].

На сучасних суднах проводиться моніторинг стану й функціонування окремих відповідальних деталей ЦПГ. Спеціальний швидкодіючий датчик, установлений вище продувних вікон на циліндровій втулці двигуна, вимірює частоту й амплітуду акустичних коливань, що виникають при проходженні кільця повз датчик по суцільній поверхні втулки й гідродинамічних умови мащення. На підставі цієї інформації встановлюється працездатний стан сполучення "кільце-втулка". Однак, при малих швидкостях руху поршня, у момент проходження продувних вікон втулок, умови мащення погіршуються через продувку й, режим змащення вже не є гідродинамічним. Товщина плівки зменшується, у тонкому мастильному шарі виникають анізотропні властивості, що змінюють природу взаємодії "кільце-втулка" за рахунок розклинюючого тиску, що перешкоджає виникненню адгезійного контакту. Розклинюючий тиску циліндрового мастила на сталях і чавунах носять експонентний характер. Максимальне значення розклинюючого тиску, що виникає в тонкій плівці циліндрового мащення складає: для чавунного кільця дорівнює 140 кПа; на сталі 45 ... 40 кПа; на сталі 35ХМА – 2,49 кПа. Мінімальна товщина плівок шару мащення, при якій розклинюючий тиск досягає

максимуму для всіх досліджених матеріалів лежить в інтервалі 140 ... 160 нм. Поршневе кільце зберігає працездатний стан при товщини плівки мащення, що й виключає контакт між сполученими поверхнями, при її значенні більш 140 нм [4].

Дані, отримані у результаті впровадження методу ідентифікації й спосіб діагностики технічного стану поршневих кілець СДВЗ за частотою акустичного сигналу при русі кілець уздовж продувних вікон втулки, дозволили дійти таких висновків.

До більш детального розуміння ефективних коефіцієнтів в'язкості й щільності мастильного шару можна прийти в результаті аналізу завдання про рух важкої частки в середовищі, яке коливається, з опором типу сухого тертя. При вібрації тертя трансформується (відносно повільних рухів) у нелінійно-в'язке. Причому частка, яка при відсутності вібрації або знаходилася у стані спокою або падала (спливала) прискорено, буде спливати з постійною середньою швидкістю, яка визначається з рівняння $m_0(\Delta - 1)g = W(V_z)$, а саме

$$V_z = r\omega\delta_1 \sqrt{\left[\frac{m_0(\Delta-1)}{m_1\sqrt{1-\delta_1^2}} \right]^2 - \left[\frac{F_h}{m_1r\omega^2} \right]^2} \approx \frac{\delta_1}{\sqrt{1-\delta_1^2}} \frac{m_0}{m_1} (\Delta-1)r\omega, \quad (1)$$

де $\delta_1 = m_0(\Delta - 1)g/F_v$; m_0 – маса середовища в об'ємі, який дорівнює об'єму частки; $\Delta = \rho^*/\rho$ – співвідношення середніх щільностей частки та середовища; g – прискорення вільного падіння; W – вібраційна сила.

Якщо зіставити значення V за (1) з виразом для швидкості вільного падіння сферичної частки у звичайній в'язкої рідині при малих числах Рейнольдса та $V_z = m_0(\Delta - 1)g / 3\pi\mu d$ (μ – коефіцієнт в'язкості рідини, d – діаметр частки), то значення ефективного коефіцієнта в'язкості (коефіцієнта вібров'язкості) можливо визначити як:

$$\mu^* = \frac{F_v\sqrt{1-\delta^2}}{3\pi dR\omega} = \frac{F_v(3\pi d r\omega)^{-1}}{\sqrt{\left[\frac{m_0(\Delta-1)}{m_1(\sqrt{1-\delta^2})} \right]^2 - \left[\frac{F_h}{m_1r\omega^2} \right]^2}}. \quad (2)$$

Ефективні щільність і в'язкість середовища доцільно застосовувати при аналізі як лінійних, так і нелінійних коливань тіл в'язкої рідини, а також при розгляді коливань ємностей із зазначеною суспензією. У цьому випадку ефективна щільність ρ^* визначається як:

$$\frac{\rho^*}{\rho} = 1 + s(\Delta - 1) \left[1 - \frac{\Delta - 1}{\Lambda(\alpha)} \left(\Delta + 0,5 + \frac{9}{4\alpha} \right) \right], \quad (3)$$

де $\Delta = \rho^*/\rho$; $\alpha = r_0(\omega\rho/2\mu)^{0,5}$; $\Lambda(\alpha) = \Delta^2 + \Delta(1 + 4,5\alpha) + 0,25 + 81/16\alpha^4(1 + 2\alpha + 2\alpha^2 + 4/9\alpha^3)$; ρ – щільність рідини; ρ_1 – щільність часток; r_0 – їх радіус; s – об'ємна концентрація твердих часток, передбачувана щодо малої; μ – коефіцієнт в'язкості рідини; ω – частота коливань.

Ефективна щільність ρ^* завжди менше середньої щільності суміші $\rho_m = \rho[1 + s(\Delta - 1)]$. Це пояснюється тим, що більш щільні тверді частки здійснюють абсолютні коливання, менші по амплітуді, чим коливання самої рідини. Напроти, ефективна в'язкість виявляється завжди більшою, ніж в'язкість чистої рідини, внаслідок відносних коливань часток у рідині [5].

Якщо у (1 - 3) застосувати дійсні параметри величин, які отримані у [4], то можливо дійти такого висновку. Режим рідинного гідродинамічного тертя супроводжується генерацією шаром мащення вібраційних коливань у високочастотній області. При переході до режиму піврідинного гідродинамічного тертя і далі, спектр вібраційних коливань зсувається у середньо- та низькочастотну області.

Сучасні засоби технічного діагностування деталей ЦПГ функціонують в умовах концентрованого впливу потужних електромагнітних і термічних полів, під дією зовнішніх вібрацій, які створюються судновим енергетичним встаткуванням. Саме ці збурення не дозволяють забезпечити ефективну, відповідну сучасним експлуатаційним вимогам, діагностику і прогнозування технічного стану деталей ЦПГ за головною діагностичною ознакою – вібраціями у найбільш інформативному високочастотному діапазоні.

Аналіз відомих рішень доводить, що для сучасної технічної експлуатації і ремонту ЦПГ затребувані новітні засоби діагностування та прогнозування технічного стану, які є інваріантними до більшості експлуатаційних дестабілізуючих факторів [6].

Відомий пристрій, що складається з герметичного корпусу з основою та світловода з консольно закріпленим на ньому дзеркалом [7 - 9].

Використання дзеркала, консольно закріпленого на світловоді, обумовлює такі недоліки вказаного пристрою:

неможливість компенсації впливу негативних дестабілізуючих факторів, таких як підвищена температура;

створення комплексом "світловод-консоль-дзеркало" додаткових власних коливань, які можуть бути паразитними по відношенню до коливань, що створюються контрольованою поверхнею;

необхідність періодичного очищення оптичних поверхонь відкритого оптичного каналу.

Більшою мірою відповідає задачам контролю процесу мащення деталей ЦПП є пристрій, який складається з блока живлення та обробки інформації, джерела та приймача випромінювання, герметичного корпусу з основою, світловода та дзеркала, та у якому для компенсації температурного впливу застосовано біскляне дзеркало, що консольно закріплено на основі [10].

Але і цей пристрій не вільний від такого недоліку як створення комплексом "світловод-консоль-дзеркало" додаткових власних коливань, які можуть бути паразитними по відношенню до коливань, що створюються контрольованою поверхнею. Крім того, при застосуванні пристрою, існує необхідність періодичного очищення оптичних поверхонь відкритого оптичного каналу.

Таким чином, невідкладним є розв'язання завдання щодо створення пристрою, у якому підвищена захищеність елементів від неконтрольованих експлуатаційних факторів, відсутня необхідність періодичного очищення оптичних поверхонь відкритого оптичного каналу та одночасно збережені високий рівень чутливості та швидкодія волоконних пристроїв відомих типів.

На підставі проведених досліджень запропоновано технічне рішення волоконно-оптичного пристрою контролю мащення циліндрових втулок, що складається з блока живлення та обробки інформації, джерела та приймача випромінювання, герметичного корпусу з основою та світловода. Головна відмінність від існуючих аналогів полягає у тому, що до складу датчику залучено біскляний світловод, який утворює світловодну котушку з віддзеркалюючим шаром та інерційною масою на одному з кінців. Окрім котушки до складу пристрою залучені двобічний оптичний розгалужувач з оптичними фільтрами у кожній гілці, а також підсилювач сигналу та фільтр високих частот (рис).

Випромінювання від джерела 2 надходить до двобічного оптичного розгалужувача 3. Кожна гілка розгалужувача містить оптичні фільтри, які формують випромінювання зі своєю довжиною хвилі. Гілки розгалужувача сполучені з одним з кінців світловодної котушки 6 з біскляного світловоду, яка міститься у герметичному корпусі 5 з основою. Інший кінець світловодної котушки 6 з біскляного світловоду має віддзеркалюючий шар 8, та сполучений з інерційною масою 7. Випромінювання після відбиття від віддзеркалюючого шару повертається через відповідні гілки двобічного оптичного розгалужувача до приймача випромінювання 9.

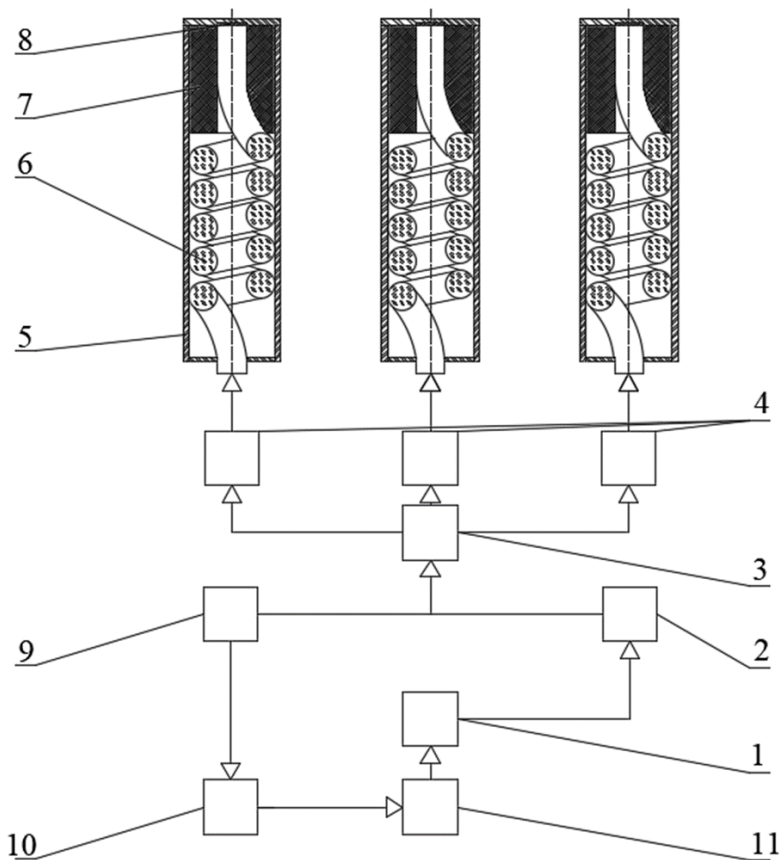


Рис. Волоконно-оптичний пристрій контролю мащення циліндрових втулок: 1 – блок живлення та обробки інформації; 2 – джерело випромінювання; 3 – двобічний оптичний розгалужувач; 4 – оптичні фільтри; 5 – герметичний корпус з основою; 6 – світловодна котушка з біскляного світловоду; 7 – інерційна маса; 8 – віддзеркалюючий шар; 9 – приймач випромінювання; 10 – підсилювач; 11 – фільтр високих частот

Електричний сигнал, який генерується у приймачі підсилюється підсилювачем 10. Після чого надходить через фільтр високих частот 11 до блоку живлення та обробки інформації 1.

Корпуси із світловодними котушками фіксуються на зовнішньому боці циліндровою втулки уздовж лінії трибологічного контакту втулки та поршневих кілець.

У статичному режимі (двигун, який контролюється не працює), у елементах датчику відбувається зменшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить скрізь них, яке обумовлене тільки впливом дестабілізуючих неконтрольованих факторів. У цьому режимі, під впливом температури, змінюється геометрія котушки з біскляного світловода. Зміна радіусу вигину витків котушки викликає зміни умови модуляції опорного випромінювання пропорційно впливу зовнішніх факторів. Зафіксовані зміни враховуються в подальшому як відповідні поправки.

У динамічному режимі (двигун, поверхні якого контролюються, у робочому режимі) під впливом вібрації відбувається рух інерційної маси, який перетворюється на зміни умови модуляції опорного випромінювання у котушки з біскляного світловода пропорційно до величині вимірюваної вібрації у трибологічному контакті контрольованої поверхні.

Під впливом механічних коливань, які генеруються у наслідок трибологічного контакту між дзеркалом поверхні циліндрової втулки, шаром мащення та поршневими кільцями, виникають високочастотні механічні коливання. Коливання сприймаються інерційною масою, яка вільно пересувається у герметичному корпусі та спричиняє деформації стиску у світловодній котушці з біскляного світловода. Деформації світловодної котушки викликають модуляцію опорного світлового випромінювання, яке надходить від джерела до котушки з віддзеркалюючим шаром та у зворотному порядку до приймача випромінювання [11, 12].

Під впливом температури біскляний світловод змінює свою геометрію та відповідно умови модуляції опорного випромінювання. Таким чином відбувається компенсація неконтрольованих дестабілізуючих факторів [13, 14].

Подальша обробка величини інтенсивності випромінювання, що надходить до приймача випромінювання, після його підсилення та фільтрації, дозволить отримати електричний сигнал, який буде адекватний умовам мащення у трибологічному контакті, та в якому буде компенсована паразитна складова від впливу дестабілізуючих факторів.

Застосування котушки з біскляного світловода відповідної жорсткості у сполученні з інерційною масою дозволить більш адекватно оцінювати перетворення параметрів вібрації трибологічного контакту

у зміни інформаційного сигналу. В додаток використання біскляного світловоду забезпечить компенсацію впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал пристрою. Термостійкі компоненти біскляного світловоду дозволять максимально наблизити пристрій до джерела виникнення вібрації у контрольованих точках трибологічного контакту [15]. А перехід до закритого оптичного каналу пристрою виключить підвищення якості функціонування за рахунок переходу до закритого оптичного каналу виключить необхідність періодичного очищення відкритих оптичних поверхонь.

Таким чином буде здійснена інваріантність пристрою до дестабілізуючих факторів та реалізована можливість застосування в спеціальних умовах експлуатації у межах єдиної інформаційно-вимірювальної мережі з пристроїв на основі волоконно-оптичних технологій [16 – 18].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Богач, В. М. Прогнозирование условий маслоподачи в цилиндры судовых дизелей // Судовые энергетические установки. – 2006. – Вып. 15. – С. 10 - 16.
2. Богач, В. М., Шебанов, А. Н., Колиев, И. Д. Истечение масла из смещенных каналов в цилиндры длинноходовых СДВС // Судовые энергетические установки. – 2006. – Вып. 17. – С. 38 - 46.
3. Богач, В. М., Шебанов, А. Н., Колиев, И. Д., Журавлев, Ю. И. Эксплуатационные показатели эффективности лубрикаторных систем судовых дизелей // Судовые энергетические установки. – 2007. – Вып. 19. – С. 10 - 22.
4. Слободянюк, Д. И. Совершенствование методики идентификации состояния поршневых колец МОД на основе экспериментального исследования частоты акустического сигнала // Проблемы техники. – 2012. – № 3. – С. 68 - 75.
5. Вибрации в технике: в 6 т. / Машиностроение. – М., 1979. – Т.2: Колебания нелинейных механических систем. – 351 с.
6. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.
7. Моек, Е., Штрикерт, Х. Техническая диагностика судовых машин и механизмов. – Л.: Судостроение, 1986. – 232 с.

8. Pinet, Éric Temperature fiber-optic point sensors: Commercial technologies and industrial application / Eric Pinet, Sébastien Ellyson, Frédéric Borne // MIDEEM Conference 2010. – P. 31 - 43.

9. Кузнецов, А. А., Морозов, О. Г., Нуреев, И. И., Фархутдинов, Л. М., Артемьев, В. И. Датчик износа и температуры изделия на основе волоконно-оптического чувствительного элемента / А. А. Кузнецов, О. Г. Морозов, И. И. Нуреев, Л. М. Фасхутдинов, В. И. Артемьев // Известия СНЦ, – 2015. – Т. 17. – № 6 (2). – С. 455 - 460.

10. Патент України № 146258. МПК (2006) G01M 11/08 (2006.01), G02B 6/00. Волоконно-оптичний датчик зношування / А. К. Сандлер, М. О. Опришко, Г. О. Кузнецова; заявник та володар патенту Національний університет "Одеська морська академія". – u202005716. – заявл. 04.09.2020; опубл. 03.02.2021, бюл. № 5/2021. – 3 с.

11. Гуляев, Ю. В., Меш, М. Я., Проклов, В. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 152 с.

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

13. Температурный коэффициент линейного расширения стекла при различных температурах. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/keramika-i-steklo/temperaturnyj-koeffitsient-linejnogo-rasshireniya-stekla-pri-razlichnyh-temperaturah>.

14. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277 - 279.

15. 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.

16. Сандлер, А. К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій. – Одеса: Видатінформ НУ"ОМА", 2018. – 165 с.

17. Веретенник, О. М., Сандлер, А. К. Технічне діагностування об'єктів суднових енергетичних установок: довідник. – Одеса: Фенікс, 2019. – 167 с.

18. Sandler, A., Budashko, V. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – №. 5 (119). – P. 25 - 33.

19. Сандлер, А. К., Опришко, М. О. Волоконно-оптичний засіб захисту суднових електромереж // Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference, February 23 - 24. Dnipro, 2023. – P. 251 - 255.

Abstract. *Among the components of marine internal combustion engines, the reliability of which causes the greatest concern, the leading place belongs to the parts of the cylinder-piston group. Analysis of statistical data on the reliability of modern marine engines shows that the resource of the cylinder liner is approximately $3 \dots 4 \cdot 10^3$, piston heads - $2 \dots 3 \cdot 10^3$, covers - $3.5 \dots 4.5 \cdot 10^3$ hours. At the same time, there is a number of sudden failures that are rapidly developing, and the determination of which is impossible without the latest means and methods of technical diagnosis. Modern means of technical diagnostics of CPG parts function under the conditions of concentrated influence of powerful electromagnetic and thermal fields, under the influence of external vibrations created by the ship's power equipment. It is these perturbations that do not allow to provide effective diagnosis and forecasting of the technical condition of the parts of the CPG according to modern operational requirements based on the main diagnostic feature - vibrations in the most informative high-frequency range. The analysis of known solutions proves that modern technical operation and repair of gas turbines requires the latest means of diagnosing and forecasting the technical condition, which are invariant to most operational destabilizing factors. It is proposed to solve the given problem through the introduction of a new fiber-optic device for monitoring the lubrication of the cylinder sleeve. The main difference from the existing analogues is that the sensor includes a bi-glass light guide, which forms a light guide coil with a reflective layer and an inertial mass at one end. In addition to the coil, the device includes a two-way optical splitter with optical filters in each branch, as well as a signal amplifier and a high-pass filter. The creation of a fiber-optic lubrication control device will allow obtaining a measuring tool that is invariant to the uncontrolled effects of destabilizing factors and has sufficient sensitivity to the controlled parameters. The use of such a tool will contribute to the organization of constant and long-term control of the lubrication process of the tribological contacts of the parts of the cylinder-piston group.*

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-13-24

ARTICLE HISTORY

Received 28.08.2024

Accepted 25.09.2024

Будуров Микола Ігорович
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
budurovuk@gmail.com

Перспективні шляхи покращення екологічності суден торгового флоту

Budurov Mykola
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
budurovuk@gmail.com

Promising ways to improve the environmental friendliness of merchant fleet vessels

***Резюме.** Обґрунтовано перспективні шляхи забезпечення екологічних вимог у судноплавній галузі з урахуванням особливостей морського та внутрішнього водного транспорту. Проаналізовані кількісні показники шкідливих викидів для різних типів судових приводів. Показана ефективність впровадження перспективних рішень щодо скорочення викидів від судноплавної галузі з метою відповідності міжнародним екологічним нормам.*

***Summary.** The perspective ways for ensuring environmental requirements have been substantiated taking into account the peculiarities of maritime and internal water transport. Analyzed a quantitative indicators of harmful air emissions from various types of vessel's prime movers. The effectiveness of implementing the promising solutions regarding reducing emissions from the world shipping industry in order to comply with international environmental standards.*

Паризька угода про зміну клімату була погоджена в 2015 році Сторонами Рамкової конвенції ООН про зміну клімату і набула чинності в 2016 році. Головною метою Паризької угоди є посилення глобальної реакції на загрозу зміни клімату, утримуючи підвищення глобальної температури нижче 2 °С. Паризька угода не включає

міжнародне судноплавство, але Міжнародна морська організація, як регулюючий орган галузі, зобов'язалася зменшити викиди парникових газів від міжнародного судноплавства. У свою чергу, основним документом, який регламентує граничні значення шкідливих викидів в атмосферу від міжнародного судноплавства є Додаток VI Міжнародної Конвенції щодо запобігання забрудненню із суден (МАРПОЛ). У цьому документі викладені вимоги щодо обов'язкових цільових технічних та експлуатаційних заходів щодо скорочення інтенсивності викидів вуглецю в атмосферу від міжнародного судноплавства, що прийняті Резолюцією Комітету із захисту морського середовища МЕРС.328(76), правила щодо викидів оксидів сірки (SO_x) та твердих частинок – Резолюцією МЕРС.176(58), а також щодо викидів оксидів азоту (NO_x) – Резолюцією МЕРС.271(69). Зони контролю викидів визначені згідно з Додатком VI МАРПОЛ як зони, де потрібне прийняття спеціальних обов'язкових заходів для регулювання викидів із суден для запобігання, зменшення та контролю забруднення повітря оксидами азоту, оксидами сірки та твердими частинками. Циркуляром МЕРС.1/Circ.778/Rev.4 зонами контролю викидів визначено: зона Балтійського моря, зона Північного моря, територія Північної Америки (охоплює визначені прибережні території біля Сполучених Штатів Америки (США) і Канади) і зона Карибського моря США (навколо Пуерто-Ріко та Віргінських островів США). У свою чергу, Резолюцією МЕРС.361(79) внесені поправки щодо визначення всього Середземного моря зоною контролю за викидами оксидів сірки і твердих часток. Очікується, що новий ліміт вмісту сірки набуде чинності з 1 травня 2025 року. Відповідно до МЕРС.392(82) були прийняті поправки до Додатку VI МАРПОЛ щодо визначення арктичних вод Канади та Норвезького моря зонами контролю за викидами оксидів азоту, оксидів сірки і твердих часток. Ці зміни набудуть чинності, починаючи з 1 березня 2027 року.

У свою чергу, станом на 01.01.2024 у світі зареєстровано 108789 торгових суден валовою місткістю 100 т і більше [1]. При цьому вік світового торгового флоту за дедвейтом становив 12,5 років; середній вік за кількістю суден становив 22,4 року, що на 2 % більше, ніж за той самий період у 2023 році. Більше половини флоту за кількістю суден зараз старше 15 років. Середній вік суден зріс у всіх сегментах флоту, за винятком контейнеровозів. Балкери відносно молоді, середній вік яких становив 11,1 років, тоді як універсальні торгові судна є найстарішими – 28 років. Середній вік флоту за кількістю суден під прапорами розвинутих країн і країн, що розвиваються, на початку 2024 року становив близько 22 роки. Незважаючи на те, що в даний час

понад 30 % тоннажу світового флоту складається з "еко" суден, зростаючий вік флоту, триваюча невизначеність середньострокових заходів щодо зменшення викидів, а також невизначеність щодо динаміки розвитку флоту в довгостроковій перспективі разом із глобальним енергетичним переходом, викликає занепокоєння з огляду на прийняті міжнародні екологічні цілі щодо скорочення викидів, у тому числі, парникових газів.

Тобто на практиці спостерігається тенденція збільшення кількості особливих районів контролю викидів та посилення граничних значень викидів, проте найбільш поширеними в експлуатації наразі є старі типи конструкцій приводів, які не відповідають вимогам щодо викидів. У зв'язку з цим невідповідність показників суднових двигунів установленим вимогам щодо запобігання забрудненню від судноплавної галузі виявило проблему вибору перспективних шляхів забезпечення екологічних вимог для зниження викидів шкідливих речовин судновими енергетичними установками.

У зв'язку з викладеним метою даної роботи є обґрунтування перспективних шляхів забезпечення екологічних вимог судновими енергетичними установками, у тому числі для досягнення судноплавною галуззю у довгостроковій перспективі транспортування з нульовими викидами.

Світова судноплавна галузь відповідає за 3 % світових викидів CO₂, 5 ... 8 % викидів SO_x та 15 % викидів NO_x. Серед приводів суден суднові дизелі застосовуються на 97 %, а на парові та газові турбіни припадає 3 % [2]. Щодо приводу суден річкового флоту і їхніх генераторних установок, включаючи аварійні, то у даному випадку використання дизелів поширюється на усі без винятку торгові судна [3]. Зустрічаються і нетрадиційні комплекси з альтернативними видами енергоутворення, які використовуються переважно у складі комбінованих пропульсивних комплексів, наприклад, ротори Флеттнера. Станом на 2023 рік у світі нараховується 29 діючих торгових суден та 72 закладених на суднобудівних верфях, які у складі комбінованих пропульсивних комплексів мають рушії, які можуть використовувати силу вітру на основі ефекту Магнуса [4]. У зв'язку із упрощенням регулювання щодо порогового вмісту сірки в судновому паливі використання дизельного, а також малосірчастого важкого палива із вмістом сірки менше 0,5 % збільшилося, що у порівнянні з мазутом із вмістом сірки до 3,5 % значно зменшує викиди CO₂, але їхнє виробництво на наземних нафтопереробних заводах виробляє приблизно еквівалентну величину парникових газів [5]. На сьогодні 7113 торгових суден використовує високосірчате паливо із

судновими скрубєрними установками [6], що окрім зменшення викидів SO_x , також допомагає зменшити глобальні викиди CO_2 . У свою чергу, одним із найефективніших способів зменшення викидів у суднопластві є використання альтернативних видів палива. На теперішній час 3949 торгових судна мають пропульсивні установки з двопаливними дизельними двигунами, які можуть використовувати альтернативні види палива з низьким або нульовим вмістом вуглецю, що зменшує приблизно на 15 % викидів парникових газів, 85 ... 90 % SO_x , 10 % NO_x та 90 % твердих частинок.

Під час вибору силової установки для суден торгового флоту, у першу чергу, враховується специфіка, умови експлуатації, проектна водотоннажність, а також економічна ефективність, відповідність екологічним нормам, висока надійність [7, 8]. Наприклад, якщо до судна висуваються жорсткі вимоги до маневрових якостей або довготривалої роботи на нестационарних режимах із частою зміною навантаження, використовують приведення в дію гребної установки електродвигунами. У цьому випадку для живлення електричною енергією гребних електродвигунів встановлюють головні електричні генератори з обертанням від дизеля, парової або газової турбіни. Використання електричних силових установок переважає на пасажирських поромках, а також суднах, які використовуються для сейсмічних досліджень, розвідування нафти і газу, а також постачання матеріалів і палива на офшорні нафтодобувні станції. Збільшення електричних або гібридних силових установок в енергоменеджменті водного транспорту потенційно може покращити екологічність, підвищити надійність, знизити експлуатаційні витрати і розширити можливості автоматизації [9]. Основні переваги електричних пропульсивних комплексів полягають у низькому рівні шуму та вібрації, а також шкідливих викидів. У свою чергу, загальні втрати потужності на всіх елементах електричної пропульсивної установки становлять 8 ... 12 % [10], що набагато вище порівняно з дизельними двигунами, де втрати потужності від первинних приводів до гвинта становлять 2 ... 4 %. Наприклад, на пасажирських та офшорних суднах поширене використання поворотних гвинторульових колонок типу Azipod із безпосереднім електроприводом гребного гвинта, які також себе добре зарекомендували як надійний електричний рушійний комплекс у льодових умовах плавання [11].

Наразі світовий торговий флот зрідженого природного газу налічує 221 судно з паротурбінним приводом, що становить 33 % від його загальної активної кількості [12]. Даний вид приводу на сьогодні також використовується на деяких пасажирських поромках, переважно, у

складі комбінованих пропульсивних комплексів. У порівнянні з популярними раніше силовими установками на газовому флоті – паровими турбінами або дво- та трипаливними дизель-електричними установками, сучасні двопаливні дизельні рушійні комплекси, які так само можуть використовувати випарний газ, приблизно на 50 % ефективніші. Парові турбіни можуть мати перевагу в області дуже великої потужності, але ефективність використання палива навіть паровими турбінами високого тиску досягає максимуму 35 % [13]. Основними недоліками є велика витрата палива та час підготування, особливо порівняно з дизельними установками, а також необхідність окремої турбіни для заднього ходу, що зумовлює недостатню маневреність судна. Атомний привід є особливим типом паротурбінної системи, оскільки він у кінцевому рахунку виробляє водяний пар, який приводить у рух ротор парової турбіни. Відмінність від звичайного паротурбінного приводу полягає в тому, що тепло, необхідне для створення водяної пари, виробляється з ядерного реактора, тому не відбувається згоряння палива, а весь процес генерації тепла відбувається без присутності кисню [14]. Із метою використання ядерних технологій у судноплаванні наразі створена Морська організація ядерної енергії для усунення ядерних і морських нормативних прогалин, оцінки впливу на навколишнє середовище, а також стандартизації протоколів безпеки [15].

Газові турбіни мають порівняно низький ККД у межах 25 ... 30 % [16], наразі зустрічаються у складі комбінованих комплексів швидкісних пасажирських суден, а також на деяких видах спеціалізованих суден, наприклад, плавучих установок для видобутку, зберігання та відвантаження природних вуглеводнів [17]. Найважливіші переваги полягають у відносній малогабаритності, мінімальній вібрації, а також реалізації високошвидкісного обертання. Недоліки полягають в можливості обертання тільки в одному напрямку, високій вартості виробництва, а також низькій ефективності та великій питомій витраті палива.

Суднові дизелі відносяться до найбільш поширеного типу теплових двигунів, які використовуються на морському та внутрішньому водному транспорті. У порівнянні з іншими типами енергетичних установок суднові дизелі характеризуються мінімальними витратами як на одиницю потужності, так і на одиницю пройденого шляху [18]. Істотна перевага дизельних силових установок полягає в їхньому порівняльно високому ККД, який може сягати 49 ... 53 % [19]. Стосовно величини потужності, то дизельні двигуни стали серйозним конкурентом парових турбін. Наприклад, найбільша дизельна силова

установка Wärtsilä RT-flex96С, яка може розвивати потужність до 84420 кВт, встановлена на контейнеровозі Emma Maersk [20]. Провідними виробниками на світовому ринку суднових дизельних двигунів є Caterpillar Marine (включаючи дочірню компанію MaK) – 27 %, Hyundai Heavy Industries – 21 %, Yanmar – 18 %, MAN Energy Solutions – 13 %, Wärtsilä Corporation – 12 % та інші – 9 % [21]. Розрізняють мало-, середньо- та швидкооберткові суднові дизелі. Малооберткові в більшості випадків є двотактними, мають високу ефективність, можуть працювати з різними типами гвинтів (із фіксованою або змінною геометрією), виробляють високу постійну потужність і зазвичай вони без редукторної передачі. Щодо середньо- та швидкооберткових суднових дизелів, то переважно вони є чотиритактними та найчастіше використовується як допоміжні або головні невеликої потужності.

На суднах морського та внутрішнього водного транспорту дизелі мають найкращу перспективу у порівнянні з іншими видами приводів суднових пропульсивних та допоміжних установок завдяки:

високій термодинамічній ефективності;

великому моторесурсу, надійності і безпеці експлуатації;

можливості реверсування;

порівняльно низьким витратам на технічне обслуговування;

гнучкості вибору палива;

високому ступеню пристосованості до автоматизації;

помірній трудомісткості технічного обслуговування;

широкій можливості уніфікації вузлів та деталей;

відсутності жорстких обмежень за масою та розмірами.

Суттєвий вплив на зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу від торгових суден мають технологічні аспекти, пов'язані з покращенням енергоефективності, наприклад, системи зменшення опору корпусу судна, а також покращенням роботи систем діагностування та автоматичного регулювання суднових двигунів, наприклад, впровадженням штучного інтелекту для аналізу їхньої ефективності. Стосовно енергоефективної експлуатації існуючих суден світового торгового флоту, то необхідними є такі паливозберігаючі заходи, як підвищення ефективності систем рекуперації відпрацьованого тепла, оптимізація швидкості судна для забезпечення "вчасного" приходу, вибору оптимального співвідношення частоти обертання головного двигуна та кроку гребного гвинта на ходових режимах судна, а також впровадження альтернативних технологічних систем регенерації енергії та зберігання енергії у суперконденсаторних накопичувачах.

Щодо скорочення викидів вуглецю інноваційним рішенням є технологія уловлювання та зберігання CO₂ безпосередньо на борту судна. Провідним у цьому плані стала компанія Eastern Pacific Shipping установивши на танкері-хімовозі Pacific Cobalt таку установку, яка здатна вловлювати до 40 % CO₂ з вихлопних газів [22]. У свою чергу, використання акумуляторних батарей покращує екологічні показники як у складі комбінованих силових установках, так і у поєднанні з дизель-генераторами. Проте у зв'язку з особливостями роботи світового торгового морського флоту перспектива їхнього широкого використання як електричних енергетичних установок може поширюватися тільки на судна прибережного або внутрішнього водного плавання.

Для комплексного аналізу впливу на навколишнє середовище суднових приводів необхідна кількісна оцінка, для якої можна використовувати методологію [23], яка дозволяє оцінити викиди забруднюючих речовин у повітря від різних типів суднових двигунів, використовуючи дані щодо питомої витрати палива силовими установками торгових суден [24], виду палива [25] та типу двигуна [26], а також викиди CO₂ [27] та NO_x [28]. У табл. вказані усереднені результати розрахунків за даною методикою на основному експлуатаційному ходовому режимі суден з урахуванням вказаних вище особливостей.

Таблиця

Кількісна оцінка шкідливих викидів з урахуванням питомої витрати та виду палива для кожного типу суднових приводів

Показник	МОД			СОД		ВОД		ГТ		ПТ	
	ЗПГ	ДП	ВП	ДП	ВП	ДП	ВП	ДП	ВП	ДП	ВП
Паливо											
Питома витрата, г/кВт*год	140	185	195	203	213	203	213	290	305	290	305
CO ₂ , г/кВт*год	435	588	620	645	677	645	677	922	970	922	970
NO _x , кг/т	4,71	88,6	89,7	63,1	63,4	57,1	57,7	19,0	19,3	6,6	6,6

де МОД, СОД та ВОД – мало-, середньо- та високообертові дизелі; ГТ та ПТ – газова та парова турбіни; ЗПГ, ДП та ВП – зріджений природний газ, дизельне та мазутне паливо.

У табл. екологічні характеристики визначалися вмістом у продуктах згоряння NO_x, який за рівнем токсичності значно перевищують інші

шкідливі компоненти вихлопних газів, та CO_2 є одним з основних парникових газів, що зумовлює глобальне потепління. Використання парових або газових турбін, які у порівнянні з судновими дизелями мають значно більшу питому витрату палива, призводить не тільки до підвищення загальних експлуатаційних витрат, а до суттєвого збільшення шкідливих викидів із вихлопними газами в атмосферу і, особливо, парникових газів. У той же час, суднові дизелі порівняно з турбінними установками мають значно вищий рівень NO_x викидів, що утворюються під час згоряння палива. Для того, щоб відповідати сучасним екологічним вимогам необхідно використовувати такі технологічні рішення, як рециркуляція вихлопних газів, змінна геометрія соплового апарату турбонагнітача, впорскування води в циліндр на стадії згоряння для підвищення вологості суміш (для малооборотних дизелів), використання систем селективного каталітичного відновлення або ж прямого впорскування аміаку у вихлоп у вигляді розчину сечовини. Проте незмінним методом в області зменшення викидів NO_x у судноплаванні також залишається переналаштування параметрів робочого процесу дизеля. Стосовно екологічності нових конструкцій суднових дизелів то, наприклад, розроблені компанією WinGD сучасні двигуни з упорскуванням газу під низьким тиском типу X-DF відповідають найвищому стандарту рівня викидів і не вимагають додаткової обробки вихлопних газів. Проте на змінних режимах роботи особливо під час стохастичної зміни навантаження на головний двигун в умовах хвилювання моря або під час пуску, а також переходу з одного виду палива на інше, можуть виникати як підвищене димлення у зв'язку з незадовільною динамікою електронного регулятора частоти обертання, так і підвищена емісія шкідливих викидів із відпрацьованими газами у результаті теплового перевантаження деталей циліндрово-поршневої групи.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що враховуючи експлуатаційний період та кількість існуючих торгових суден із старими конструкціями суднових дизелів, необхідним є врахування таких перспективних шляхів забезпечення екологічних вимог:

підвищенням ефективності дизелів під час використання палив із низьким або нульовим вмістом вуглецю, але з урахуванням експлуатаційних ризиків у зв'язку з легкозаймистістю і токсичністю більшості альтернативних палив;

попередженням утворення токсичних компонентів та нейтралізація утворених токсичних домішок за допомогою додаткових систем очищення вихлопних газів;

впровадженням систем діагностування та моніторингу робочих процесів, у тому числі, на базі штучного інтелекту;

вибором оптимального співвідношення частоти обертання головного двигуна та кроку гребного гвинта для суден із гвинтами зі змінною геометрією;

покращенням енергоефективності використанням енергії вітру та сонячної енергії, а також акумуляторних батарей, паливних елементів та суперконденсаторних накопичувачів.

Наступне дослідження планується в області оцінки досягнення нульових викидів від суден світового торгового флоту з урахуванням особливостей впровадження сучасних конструкційно-технічних рішень для забезпечення екологічних показників суднових енергетичних установок.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development. // Review of Maritime Transport 2024. – United Nations Publications: Geneva. – 2024. – 166 p.

2. Nguyen H., Hoang A., Nizetic S., Nguyen X., Le A., Luong C., Chu V., Pham V. The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO₂ emission in ocean shipping: A comprehensive review. // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2020. – № 31 (11). – 29 p.

3. Sulligoi G., Vicenzutti A., Menis R. All-electric ship design: from electrical propulsion to integrated electrical and electronic power systems. // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2016. – № 2 (4). – P. 507 – 521.

4. ENERGY EFFICIENCY RETROFIT REPORT 2024: Applying wind-assisted propulsion to ships. // Lloyd's Register. – 2024. – 43 p.

5. Hoang A., Pham V. A review on fuels used for marine diesel engines. // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. – 2018. – № 41 (4). – P. 22 – 32.

6. World Fleet Register. // Clarksons Research. – Режим доступу: <https://www.clarksons.net/wfr>.

7. Pham V., Hoang A., Do H. Analysis and evaluation of database for the selection of propulsion systems for tankers. // In: International Conference on Emerging Applications in Material Science and Technology. – 2020. – № 020034. – 13 p.

8. Parsons M. Applications of optimization in eearly-stagehip design. // The Ship Science and Technology Journal. – 2009. – № 3. – P. 9 – 32.
9. Martelli M. Numerical and experimental investigation for the performance assessment of full electric marine propulsion plant. // Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources. – Taylor & Francis Group: Boca Raton. – 2018. – № 1. – P. 87 – 93.
10. Skjong E., Johansen T., Molinas M., Srensen A. Approaches to Economic Energy Management in Diesel-Electric Marine Vessels. // In: IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2017. – № 3 (1). – P. 22 – 35.
11. Symington W., Belle A., Nguyen H., Binns J. Emerging technologies in marine electric propulsion. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2016. – № 230. – P. 187 – 198.
12. WORLD LNG REPORT 2023. // International Gas Union. – 2023. – 79 p. – Режим доступу: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/07/IGU-World-LNG-Report_2023_07.pdf
13. Ito M., Hiraoka K., Matsumoto S., Tsumura K. Development of high efficiency marine propulsion plant (Ultra Steam Turbine). // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – 2007. – № 44 (3). – 5 p.
14. Saito E., Matsuno N., Tanaka K., Nishimoto S., Yamamoto R., Imano S. Latest technologies and future prospects for a new steam turbine. // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – 2015. – № 52 (2). – P. 39 – 46.
15. How close is the shipping industry to adopting nuclear for propulsion? // Lloyd's Register. – 2024. – 10 p. – Режим доступу: https://storage.pardot.com/941163/1719821070NWHAMFvm/LR_ZCFM_Nuclear_Report.pdf
16. Bonet M.U. Techno-economic and environmental assessment of an intercooled-recuperated (ICR) marine gas turbine for powering a LNG carrier. // Naval Engineers Journal. – 2017. – № 129. – P. 77 – 86.
17. Gutierrez C., Labajos C. Technical structure of the Gas carrier fleet in 2019. // Journal of Maritime Research. – 2020. – № 17 (1). – P. 86 – 92.
18. Nikolaos X. Robust control of diesel ship propulsion. // London: Springer. – 2012. – 51 p.
19. Lamaris V., Hountalas D. A general-purpose diagnostic technique for marine diesel engines - Application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel. // Energy Conversion and Management. – 2010. – № 51 (4). – P. 740 – 753.

20. Largest marine engine. // Guinness World Records – 2008. – Режим доступу: <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/largest-marine-engine#>

21. Marine Engine Industry Report. // Mordor Intelligence. – 2024. – Режим доступу: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/marine-propulsion-engine-market>

22. First LR class notation for onboard carbon capture system assigned to Eastern Pacific Shipping tanker. // Lloyd's Register. – 2024. – Режим доступу: <https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press-release/first-lr-class-notation-for-onboard-carbon-capture-system-assigned-to-eastern-pacific-shipping-tanker/>

23. Trozzi C. Vaccaro R. Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships: a 2006 update. // In: Environment & Transport 2nd International Scientific Symposium. – 2006. – 8 p.

24. Huan T., Hongjun F., Wei L., Guoqiang Z. Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers. // Propulsion Systems. – 2019. – 20 p.

25. Haglind F. A review of the use of gas and steam turbine combined cycle as prime movers for large ships, Part III Fuels and emissions. // Energy Conversion and Management. – 2008. – № 49. – P. 3476–3482.

26. Gopi M. The technical and economical aspects of marine engine selection. Dissertation ... Master of Science. – M.: WMU. – 1996. – 100 p.

27. Defra UK Ship Emissions Inventory. // Report № 21897-01. – 2010. – 168 p.

28. Lamas M.I., Rodriguez C.G. Emissions from Marine Engines and NO_x Reduction Methods. // Journal of Maritime Research. – 2012. – № 9. – P. 77 – 81.

Abstract. *Compliance of ship power plants with international environmental requirements regarding the level of atmospheric emissions is mandatory and regulated by Annex VI of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. At the beginning of 2024, 108,789 merchant ships with a gross tonnage of 100 tons and above were registered in the world. At the same time, the age of the world merchant fleet by deadweight was 12.5 years, and the average age by number of ships was 22.4 years. More than half of the fleet by number of ships is now over 15 years old.*

In practice, there is a trend towards an increase in the number of special emission control areas and tightening of emission limits, however, the most common types of vessel's prime movers in operation on merchant ships are

currently old types that do not meet the requirements for emissions in special areas. In this regard, the inconsistency of marine engine performance with the established requirements for preventing pollution from the shipping industry has revealed the problem of choosing promising ways to ensure environmental requirements for reducing emissions of harmful substances by ship power plants.

International shipping accounts for approximately 90 % of world trade, producing approximately 3 % of global CO₂, 5...8 % of SO_x and 15 % of NO_x emissions. The most common movers on merchant ships are marine diesel engines, which account for 97 %. A quantitative assessment of the impact of marine drives on the environment has shown that the use of steam and gas turbines leads to a significant increase in harmful emissions with exhaust gases into the atmosphere and, especially, greenhouse gases. At the same time, modern marine diesel engines have a significantly higher level of NO_x emissions formed during fuel combustion. In order to meet modern environmental requirements, it is additionally necessary to use, for example, selective catalytic reduction, exhaust gas recirculation or alternative fuels.

Based on the analysis conducted in the work, it can be concluded that it is necessary to take into account promising ways to ensure environmental requirements when using fuels with low or zero carbon content, but taking into account operational risks due to flammability and toxicity; prevention of the formation of toxic components and neutralization of the formed toxic impurities using additional exhaust gas cleaning systems; implementation of systems for diagnosing and monitoring work processes, including those based on artificial intelligence; selection of the optimal ratio of the main engine speed and propeller pitch for vessels with variable geometry propellers; improvement of energy efficiency by using wind and solar energy, as well as batteries, fuel cells and supercapacitor storage devices.

УДК 621.317.39:681.586.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-25-32

ARTICLE HISTORY

Received 05.09.2024

Accepted 25.09.2024

Голіков Володимир Антонович
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
Vlad.Ant.Golikov@gmail.com

Автоматизований пристрій для контролю повітряного середовища на судах

Golikov Volodymyr
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
Vlad.Ant.Golikov@gmail.com

Automated device for air environment control on ships

***Резюме.** Обґрунтовано схемотехнічне рішення датчику визначення температури точки роси. У пропонуваному пристрої забезпечена використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання. Засіб забезпечує підвищення вірогідності процесів контролю повітряного середовища на судах з метою забезпечення комфортних умов життєдіяльності екіпажу.*

***Summary.** The technical solution of the sensor for determining the dew point temperature is substantiated. The proposed device ensures the use of principles of partial invariance to external uncontrolled influences on measurement. The tool ensures an increase in the probability of air environment control processes on ships in order to ensure comfortable living conditions for the crew.*

За високої температури повітря людське тіло використовує випаровування поту для свого охолодження. Ця функція дуже ефективна, але за певних умов. Швидкість випаровування поту залежить від того, скільки вологи міститься в повітрі і скільки вологи воно може утримувати при визначеному тиску. Якщо повітря вже

насичене вологою (при відносній вологості 100 %), випаровування поту припиняється. Терморегуляція тіла буде викликати потовиділення, щоб підтримувати нормальну температуру тіла, навіть якщо швидкість, з якої виділяється піт, перевищує швидкість випаровування. Це пояснює те, чому у вологих спекотних умовах на суднах можливо покритися потом навіть без застосування будь-яких фізичних навантажень. В цьому випадку, точка роси буде максимально наближена до фактичної температури і зазвичай якщо вона становить вище 16 ... 18 °С, то людина відчуває задуху, складнощі з фізичними навантаженнями. Відчуття дискомфорту часто супроводжуються головною білло. Максимально зареєстрований показник точки роси на планеті у природних умовах становив 35 °С. Це значення було зафіксовано 8 липня 2003 року у місті Дахран. Фактична температура повітря на той день склала 42,2 °С. З урахуванням слабого вітру в 1 м/с, ефективна температура (віртуальна температура, яку відчувала б людина, одягнена за сезоном) досягла 115 °С!

Дискомфорт також викликають низькі значення точки роси (в основному нижче -5 °С), оскільки це свідчить про вкрай низький рівень вологості повітря. Сухе повітря може викликати розтріскування шкіри та пересихання слизових оболонок носоглотки і дихальних шляхів. Тому рекомендується підтримувати температуру в суднових приміщеннях в межах 19 ... 24 °С та відносну вологість 20 ... 60 %, що еквівалентно точці роси в діапазоні 4,0 ... 16 °С). Люди, які звикли до помірного клімату, часто починають почуватися некомфортно, коли точка роси перевищує 15 °С, у той час як іншим може здаватися комфортною точка роси до 18 °С. Тепловий комфорт залежить не тільки від фізичних особливостей доквілля, а й від психологічних факторів [1 - 4].

Таким чином, проблема забезпечення життєзабезпечення суднового персоналу прямо пов'язана з рішенням такого завдання як оптимізація складу й режимів експлуатації системи кондиціонування повітря на основі достовірної інформації про параметри навколишнього середовища.

Для пошуку більш доцільного шляху отримання достовірної вимірювальної інформації проаналізовані найбільш поширені типи пристроїв для визначення параметрів атмосферного газового середовища, а саме температури точки роси.

Традиційно на суднах використовується датчик точки роси, який складається з вимірювальної камери, трубопроводу стислого газоповітряного середовища, впускного та випускного клапанів,

датчику тиску, обчислювального пристрою, сухого і мокрого термометрів, системи керування повітряпідготовкою та індикатора [5].

Використання вимірювальної камери та системи трубопроводів з клапанами та датчиків викликає необхідність регулярного очищення поверхонь вимірювальної камери та системи трубопроводів з клапанами від корозійних забруднень та супроводжується ускладненням конструкції та збільшенням коштовності пристрою. Одночасне застосування сухого і мокрого термометрів супроводжується неідентичністю вимірювань та, певним чином, обмежує метрологічні характеристики датчику тиску.

Більшою мірою задачі вірогідного визначення точки роси газового середовища відповідає волоконно-оптичний датчик, що складається з джерела оптичного випромінювання, волоконно-оптичних розгалужувачів, контрольного та чутливого, зі сколотим під кутом до осі, світловодів, вимірювальної камери, блоку рідинного охолодження з термоелектричним охолоджувачем, платиного датчика температури та фотоприймача з обчислювальним пристроєм [6].

Використання вимірювальної камери, блоку рідинного охолодження з термоелектричним охолоджувачем та платиного термометра є передумовою таких недоліків пристрою:

- складність та коштовність конструкції;
- необхідність регулярного очищення поверхонь вимірювальної камери від корозійних забруднень;
- складність сполучення скляного чутливого світловоду та платиного термометру;
- розташування контрольного світловода поза межами вимірювальної камери;
- застосовані матеріали з коефіцієнтами теплового поширення, які суттєво відрізняються для різних елементів датчика;
- необхідність постійного корегування взаємного розташування елементів, яке змінюється під впливом експлуатаційних факторів.

Таким чином, актуальним є створення волоконно-оптичного датчику точки роси, у якому застосовані матеріали с близькими коефіцієнтами теплового поширення, відсутня необхідність регулярного очищення поверхонь вимірювальної камери від корозійних забруднень, відсутня необхідність постійного корегування взаємного розташування елементів, яке змінюється під впливом експлуатаційних факторів, та одночасно збережені властивості датчиків роси відомих типів.

Для вирішення завдання запропонований волоконно-оптичний датчик точки роси, що складається з джерела оптичного випромінювання, волоконно-оптичних розгалужувачів, контрольного та чутливого, зі сколотим під кутом до осі, світловодів, вимірювальної камери, датчика температури та фотоприймача з обчислювальним пристроєм. Від існуючих аналогів датчик відрізняється тим, що термоелектричний охолоджувач утворений сполученням чутливого світловоду з діоксиду олова, легованого танталом та зі сколом під кутом до осі, та елементу з оксиду індію, до яких надходить випромінювання від джерела випромінювання, а живлення від блоку живлення відповідно. Датчик температури є світловодом з германосилікатного скла, а оптичний розгалужувач сполучений з чутливим, контрольним та світловодом з германосилікатного скла світловодами з оптичними фільтрами.

Для відбору газового середовища застосовано вимірювальну камеру 1, яка виконана у вигляді циліндру з замкнутими торцями та отвором-приймачем (рис.) [7]. У камері містяться жорстко сполучені між собою, виконані з прозорого напівпровідника чутливий світловод 2, зі сколом торця під кутом до осі, та елемент з оксиду індію 3 [8]. Разом вони утворюють термоелектричний охолоджувач – елемент Пельтьє. До чутливого світловоду 2 та елементу 3 живлення надходить від блоку живлення 11. Також у вимірювальній камері міститься контрольний світловод 5 та світловод-термометр з германосилікатного скла 6. До чутливого, контрольного світловоду та світловоду-термометру з германосилікатного скла також надходить випромінювання від джерела випромінювання 9.

Оптичний розгалужувач 8 сполучений з чутливим світловодом 2, контрольним світловодом 3 та світловодом світловодом-термометром з германосилікатного скла 6, світловодами 4. Світловоди 4, як гілки розгалужувача, виконані з штучного сапфірового волокна та містять у собі оптичні фільтри 7 [9, 10]. У зворотному порядку випромінювання від світловодів 2, 5, 6 надходить до фотоприймача 10, який сполучений з обчислювальним пристроєм 12.

У статичному режимі (калібрування) випромінювання від джерела надходить до оптичного розгалужувача та крізь оптичні фільтри до чутливого, контрольного світловоду та світловоду-термометру з власною довжиною хвилі. Після проходження світловодів випромінювання відбивається від торців та повертається у зворотному порядку до фотоприймача.

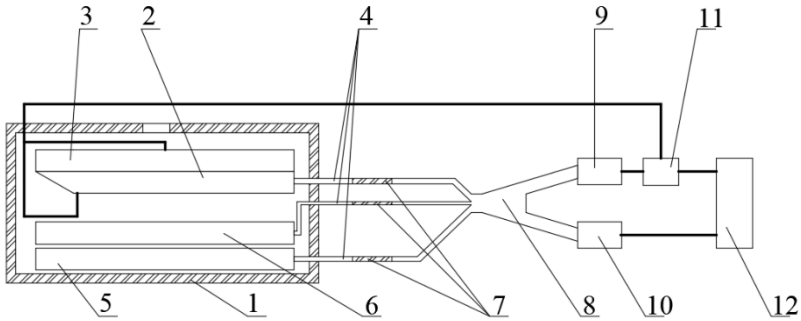


Рис. Волоконно-оптичний датчик точки роси:

1 – вимірювальна камера; 2 – чутливий світловод; 3 – елементом з оксиду індію; 4 – світловод; 5 – контрольний світловод; 6 – світловод-термометр з германосилікатного скла; 7 – оптичний фільтр; 8 – оптичний розгалужувач; 9 – джерело оптичного випромінювання; 10 – фотоприймач; 11 – блок живлення; 12 – обчислювальний пристрій

Зареєстроване фотоприймачем випромінювання у блоці обробки і виводу сигналу фіксується як поправка до результатів вимірювання, яка обумовлена впливом експлуатаційних чинників.

У динамічному режимі (вимірювання) до чутливого світловоду 2 та елементу 3 живлення надходить від блоку живлення 11. Світловод 2 та елемент 3 утворюють контакт двох напівпровідникових матеріалів з різними рівнями енергії електронів у зоні провідності. При протіканні струму через контакт таких матеріалів електрон придбає енергію та переходить до більш високоенергетичну зону провідності іншого напівпровідника. При поглинанні цієї енергії відбувається охолодження світловоду 2. У момент, коли поверхня сколу світловоду 2 після охолодження затуманюється вологою – рососою, що випала з повітря, вимірюють температуру, яка дорівнює температурі крапки роси повітря. Момент створення роси фіксується після у момент максимальної зміни інтенсивності випромінювання, яке відбивається від поверхні сколу світловоду 2 та повертається у зворотному порядку до фотоприймача [11 - 13].

Величина інтенсивності випромінювання, яке відбивається від поверхні сколу залежить від коефіцієнту пропускання через поверхню. Коефіцієнт пропускання визначається [14]

$$\tau = 1 - \left| (\mu^2 - \delta^2) \left[(\mu^2 - \delta^2)^2 + 4\delta^2\mu^2 \operatorname{cth}(\beta d) \right]^{-1} \right|,$$

де d – товщина шару роси; β – постійна поширення;

$$\beta = \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) (n_1^2 \sin^2 \Theta - 1)^{0.5},$$

$$\mu_{\perp} = \frac{1}{n_1 \cos \Theta}; \mu_{\parallel} = \frac{\cos \Theta}{n_1},$$

$$\delta_{\perp} = -(n_1^2 \sin^2 \Theta - 1)^{0.5}; \delta_{\parallel} = (n_1^2 \sin^2 \Theta - 1)^{0.5},$$

де індекси \perp та \parallel вказують на напрям поляризації відносно площини рисунка).

Вимірювання температури здійснюється світловодом-термометром з германосилікатного скла, якому притаманна лінійна залежність показника заломлення від температури навколишнього середовища. Ця залежність обумовлена зміною інтенсивності випромінювання, що відбивається від торця світловоду b та повертається до фотоприймача.

Контрольний світловод застосовується для компенсації впливу експлуатаційних чинників на результати вимірювання.

Конструкції і комбінації матеріалів забезпечує відсутність необхідності постійного корегування взаємного розташування елементів, яке змінюється під впливом експлуатаційних факторів та відсутність необхідності регулярного очищення поверхонь вимірювальної камери від корозійних забруднень.

Пропонований засіб забезпечує підвищення вірогідності процесів контролю газового середовища за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання, запропонованим методом синтезу основних процесів перетворення світла, конструкції, комбінації матеріалів і одержанням вимірювальної інформації про стан атмосфери у суднових службових та житлових приміщеннях [15].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Білинський, Й. Й., Городецька, О. С., Новицький, Д. В. Аналіз методів та засобів визначення точки роси за вологою та вуглеводнями // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 4. – С. 110 – 120.
2. Берлинер, М. А. Измерение влажности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

3. Голюков, В. А., Цюпко, Ю. М., Сандлер, А. К., Просенюк, В. В. Автоматизована система терморегуляції мікроклімату // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – Вып. 21. – Одесса: ОНМА. – С. 44 - 48.
4. Голюков, В. А., Цюпко, Ю. М., Сандлер, А. К. Пристрій для моніторингу мікрокліматичних умов в суднових приміщеннях // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – Вып. 21. – Одесса: ОНМА. – С. 40 - 44.
5. Патент РФ № 2082157 С1. МПК G01 N 25/66. Способ измерения температуры точки росы сжатой газовой среды / В. А. Голюков; заявитель и патентообладатель ОГМА. – 4943362/25. – заявл. 08.04.1991; опубл. 20.06.1997, бюл. № 17. – 3 с.
6. Fiber optic sensors / Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S. Yu, eds. – 2nd ed. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2008. – 477 p.
7. Сандлер, А. К., Михова, А. И., Олефиренко Д. А. Волоконно-оптический датчик температуры // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 275 - 276.
8. Fukumoto, M., Nakao, S., Shigematsu, K. et al. High mobility approaching the intrinsic limit in Ta-doped SnO₂ films epitaxially grown on TiO₂ (001) substrates // Sci Rep 10, 6844 (2020).
9. 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.
10. Сандлер, А. К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій: навчальний посібник. – Одеса: Видатінформ НУ "ОМА", 2018. – 165 с.
11. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М. Новое схмотехническое решение волоконного газоанализатора // Автоматизация судовых технических средств. – 2012. – Вып. 18. – Одесса: ОНМА. – С. 93 - 96.
12. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, А. А., Цюпко, К. Ю. Схмотехническое решение инвариантного датчика влажности // Автоматизация судовых технических средств. – 2012. – Вып. 18. – Одесса: ОНМА. – С. 97 - 102.
13. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. Схмотехнічне рішення комбінованого датчика клімат-контролю // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – Вып. 19. – Одесса: ОНМА. – С. 69 - 73.

14. Бусурин, В. И., Носов, Ю. Р. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

15. Budashko, V., Sandler, A., Shevchenko, V. Diagnosis of the technical condition of high-tech complexes by probabilistic methods // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2022. – V. 16. – № 1. – P. 105 - 111.

Abstract. *The problem of ensuring the life support of the ship's personnel is directly related to the solution of such a task as optimization of the composition and operation modes of the air conditioning system on the basis of reliable information about the parameters of the surrounding environment. In order to find a more appropriate way of obtaining reliable measurement information, the most common types of devices for determining the parameters of the atmospheric gas medium, namely the dew point temperature, were analyzed. To solve the problem, the design of a fiber-optic dew point sensor is proposed, consisting of a source of optical radiation, fiber-optic splitters, control and sensitive, split at an angle to the axis, light guides, a measuring camera, a temperature sensor, and a photoreceiver with a computer device. The sensor differs from existing analogues in that the thermoelectric cooler is formed by the combination of a sensitive light guide made of tin dioxide doped with tantalum and with a chip at an angle to the axis, and an element made of indium oxide, which receives radiation from the radiation source, and power from the power supply, respectively. The temperature sensor is a light guide made of germanosilicate glass, and the optical splitter is connected to the sensitive, control and light guide made of germanosilicate glass by light guides with optical filters. The proposed tool provides an increase in the probability of the processes of controlling the gaseous environment due to the use of the principles of partial invariance to external uncontrolled influences on measurements, the proposed method of synthesis of the main processes of light transformation, construction, combination of materials and obtaining measurement information about the state of the atmosphere in the ship service and residential premises.*

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-33-42

ARTICLE HISTORY

Received 17.10.2024

Accepted 07.11.2024

Горб Сергій Іванович¹, Сагайдак Олександр Іванович²,
Горб Олексій Сергійович³
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна¹
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна²
Intresco Limited³
gs@onma.edu.ua¹, captalex@te.net.ua², alexgorbmail@gmail.com³

Використання штучного інтелекту для оцінки ризиків на морських судах

Gorb Sergii¹, Sagaydak Oleksander², Gorb Oleksii³
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine¹
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine²
Intresco Limited³
gs@fa.onma.edu.ua¹, captalex@te.net.ua², alexgorbmail@gmail.com³

Using artificial intelligence for risk assessment on marine vessels

Резюме. Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден та запобіганням забрудненню вимагає "оцінити всі ідентифіковані ризики, пов'язані з суднами, персоналом та довкіллям та організувати відповідний захист від них". Виконане дослідження дозволило визначити можливості штучного інтелекту для адміністрування ризиками на судах та показало його ефективність. Наведено приклад використання ChatGPT для ідентифікації небезпек у конкретній судовій операції, а також для оцінки у кожній небезпеці: категорії збитків, категорії її імовірності та категорії ризику. Для ризиків високої та середньої категорій ChatGPT запропонував заходи захисту та оцінив ефективність запропонованих заходів.

Summary. The International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention requires that "assess all identified risks to ships, personnel and the environment and establish appropriate

safeguards". The conducted research identified the potential of artificial intelligence in risk management for ships and demonstrated its effectiveness. As an example, was provided use of ChatGPT for identifying hazards in specific ship operation. Additionally, it assessed each hazard's damage category, probability category and risk category. For risks classified as high and medium, ChatGPT proposed protective measures and evaluated the effectiveness of these measures.

Експлуатація морських суден супроводжується численними ризиками, такими як технічні відмови, аварійні ситуації, людські помилки, вплив несприятливих погодних умов, екологічні загрози та кібератаки.

З 01.07.2010 відповідно до резолюції MSC.273(85) Комітету з морської безпеки Міжнародної морської організації (ІМО) набули чинності зміни до Міжнародного кодексу з управління безпечною експлуатацією суден та запобіганням забруднення (ISM Code), який був прийнятий резолюцією ІМО А.741(18). Ці зміни вимагають "оцінити всі ідентифіковані ризики, пов'язані з суднами, персоналом та докільям та організувати відповідний захист від них". У свою чергу, резолюція ІМО А.1188(33) "2023 Guidelines on implementation of the International Safety Management (ISM) Code by Administrations" наказує, щоб зазначена вимога була реалізована системою управління безпекою, а адміністрації держав контролювали відповідність цих систем ISM Code.

У національному законодавстві пунктами 1.1 Додатків 1 та 2 до Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському та річковому транспорті, що затверджено наказом Міністерства транспорту України від 20.11.2003 № 904, також вимагається забезпечити основну мету судноплавної компанії, пов'язану з "забезпечення захисту від усіх ризиків, що виявлені". Термін реалізації цієї вимоги встановлено з 01.07.2004, тобто за 6 років до відповідної вимоги ISM Code.

Однак аналіз фактичної реалізації нормативних вимог показує, що виконання цих завдань залишається незадовільним через наступні адміністративні та організаційні складнощі [1, 2, 3].

1. До керівництв із систем управління безпекою формально переписуються тексти універсального характеру з джерел:

ДСТУ ISO 31000:2018 (ISO 31000:2018). Менеджмент ризиків. Принципи та настанови;

ДСТУ EN IEC 31010:2022. Керування ризиками – методи оцінки ризиків;

Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2), навіть без урахування того, що цей документ спрямований взагалі для оцінки ризиків у нормотворчому процесі, а не при виконанні судових операцій;

A Guide to Risk Assessment in Ship Operations – No 127: IACS Rec. 2012/Rev.1 2021. – 6 p.;

Marine risk assessment: Offshore Technology Report 2001/063. /Det Norske Veritas. – Health and Safety Executive. – 2002. – 94 p.

IEC 61882:2016. Hazard and operability studies (HAZOP studies): Application guide. Edition 2.0. – Geneva: IEC. – 2016. – 195 p.

Відповідно, керівництва із систем управління безпекою не містять конкретних процедур щодо оцінки ризиків стосовно конкретних судових операцій. Це означає, що фактично творча складова щодо оцінки ризиків перекладається на судові екіпажі, без урахування того, що така компетентність не передбачена навіть на рівні управління міжнародними та національними вимогами [4, 5, 6].

2. Звітність щодо оцінки ризиків і захисту від них при виконанні судових операцій надмірно зарегульована вимогами оцінювати ризики "завжди і всюди" із заповненням універсальних форм, у яких необхідно перелічити: всі загрози, що супроводжують судову операцію; заходи, які діють на судні для зменшення ймовірності кожної загрози; додаткові можливі заходи для зменшення ймовірності кожної загрози; процедури/чек-листи, які застосовуються під час виконання судової операції; плани/чек-листи дій на випадок виникнення аварійної ситуації. Після цього потрібно оцифрувати ймовірність виникнення кожної загрози та можливий збиток у разі її виникнення з обґрунтуванням зафіксованих числових значень, а також за таблицею або матрицею оцінити категорію кожного ризику. Заповнену форму часто потрібно узгоджувати з офіцером безпеки, призначеним для цього, та затверджувати у капітана.

3. Останнім часом підвищилася інтенсивність праці судових екіпажів через збільшення планових швидкостей суден та більш швидку обробку суден у портах. Відповідно, судові екіпажі мають менше часу на виконання адміністративних дій з оцінки ризиків або виконують цю роботу в умовах втоми. Непоодинокими є випадки, коли на судах звітні форми з оцінки ризиків заповнюються після проведення судових операцій. В результаті людський фактор навіть за

наявності якісних процедур з оцінки ризиків може не лише суттєво погіршити реалізацію вимог щодо оцінки ризиків, а й призвести до катастрофічних наслідків при виконанні суднових операцій.

Оскільки судноплавні компанії зобов'язані сертифікувати свої системи управління безпекою, незадовільний менеджмент оцінкою ризиків часто маскується паперовими кампаніями, які відволікають персонал від виконання важливих обов'язків.

Викладене означає, що є практична проблема покращення адміністрування оцінкою ризиків та захисту від них на морських судах. Ця проблема безпосередньо пов'язана із забезпеченням безпеки судноплавства.

Для вирішення поставленої проблеми у роботі [2] запропоновано вдосконалювати суднові комп'ютеризовані системи технічного менеджменту, які останнім часом стали називати комп'ютеризованими системами управління активами суден. Удосконалення полягає в автоматизованому формуванні списків можливих ризиків (загроз) для кожного виду/класу суднових операцій. Таким чином, для кожної суднової операції може генеруватися унікальна форма з можливими ризиками та типовими заходами щодо зменшення їх ймовірності. Такі форми генеруються та додаються до нарядів на виконання судноплавних операцій/робіт у випадках, коли судноплавна компанія прийняла рішення оцінювати ризики у відповідних видах/класах суднових операцій. Це значно спрощує адміністрування ризиками. Однак запровадження такої пропозиції можливе лише у розвинених системах технічного менеджменту та може бути здійснено лише виробниками цих систем. Судноплавні компанії позбавлені можливості доопрацювати алгоритм використовуваних систем технічного менеджменту. Також для автоматизації формування якісних списків можливих ризиків потрібна наявність відповідного класифікатора видів/класів суднових операцій/робіт.

Якщо судноплавна компанія просто додає до комп'ютеризованої системи звітні форми з оцінки ризиків без автоматизації формування їх змісту, якість адміністрування ризиками не покращується. З'являється лише можливість електронного заповнення цих форм, що дає незначний ефект.

В даний час найбільш перспективною гіпотезою можливості суттєвого покращення адміністрування ризиками на судах є використання інструментів штучного інтелекту, зокрема ChatGPT.

Для ефективного застосування штучного інтелекту в менеджменті ризиками необхідно:

розробити та включити до судову процедуру оцінки ризиків рекомендації щодо формулювання prompts (підказок, тверджень та питань), які підвищують якість відгуків штучного інтелекту;

адаптувати штучний інтелект до діючих у судноплавній компанії регламентів та процедур;

проекспериментувати з різними формулюваннями prompts, додатковими запитам та досягти максимальної ефективності його відгуків;

розробити та реалізувати рекомендації щодо навчання штучного інтелекту на нових даних.

Пробне застосування штучного інтелекту показало, що він може використовуватися для автоматизації формування, адаптації і заповнення як чек-листів судових операцій, так і звітних форм з оцінки ризиків з урахуванням поточних умов. При цьому штучний інтелект може враховувати безліч факторів, включаючи тип судна, характер операції, погодні умови, кваліфікацію персоналу та стан обладнання.

На основі раніше накопичених відомостей штучний інтелект здатний автоматично сформувати список потенційних ризиків (загроз), які необхідно враховувати. Також штучний інтелект дозволяє змінювати зміст чек-листів у реальному часі, додаючи пункти залежно від поточної ситуації. Наприклад, у разі погіршення погодних умов або виникнення будь-яких обмежень, у тому числі через технічні несправності, автоматично додаються відповідні рекомендації та попередження.

Штучний інтелект на основі даних про попередні судові операції та інциденти може запропонувати заповнення деяких пунктів чек-листів, включивши до них запобіжні заходи, а також заповнення звітних форм з оцінки ризиків.

Відгук штучного інтелекту при формуванні та заповненні чек-листів та звітних форм займає лічені секунди, що особливо важливо в умовах обмеженого часу. Одночасно мінімізуються людські помилки. Це сприяє покращенню безпеки, зниженню адміністративного навантаження на персонал та більш ефективному виконанню вимог ISM Code.

Як приклад у чат-бот із штучним інтелектом ChatGPT був відправлений наступний prompt, який містить загальну для оцінки ризиків інформацію (може використовуватися в судноплавній компанії для всіх запитів щодо оцінки ризиків) та спеціальну, яка стосується лише конкретної судової операції.

У компанії діє процедура оцінки ризиків, згідно з якою втратам надаються категорії:

дуже великі (понад 100 тисяч доларів США або широке негативне висвітлення в міжнародних засобах масової інформації або більше одного смертельного результату);

великі (від 75 до 100 тисяч доларів США або широке негативне висвітлення у місцевих засобах масової інформації або один випадок смерті);

середні (від 50 до 75 тисяч доларів США або кілька негативних публікацій у засобах масової інформації або випадок серйозного захворювання/травми людини);

низькі (від 25 до 50 тисяч доларів США або поширення негативних відгуків або випадок захворювання/травми людини середньої тяжкості);

дуже низькі (менше 25 тисяч доларів США або менше трьох негативних відгуків або випадок захворювання/травми людини легкої тяжкості).

Імовірність ризиків оцінюється категоріями: *дуже висока; висока; середня; низька; дуже низька.*

Ризикам відповідно до таблиці присвоюються категорії: *критичний; високий; середній; низький; несуттєвий.*

Категорія втрат	Категорія ризику за імовірності				
	дуже висока	висока	середня	низька	дуже низька
Дуже великі	критичний	критичний	високий	високий	середній
Великі	критичний	високий	високий	середній	низький
Середні	високий	високий	середній	низький	низький
Низькі	високий	середній	низький	низький	несуттєвий
Дуже низький	середній	низький	низький	несуттєвий	несуттєвий

Запланована дезінсекція препаратом BIFEN I/T житлових, громадських, службових, побутових і санітарно-гігієнічних приміщень вантажного судна дедвейтом 60 тис. т.

Необхідно наступне.

1. Ідентифікувати ризики (небезпеки), пов'язані з дезінсекцією.
2. Використовуючи опубліковану статистику щодо дезінсекції службових приміщень, оцінити:

категорію втрат для кожної небезпеки;

категорію імовірності для кожної небезпеки.

3. На основі оцінок категорій втрат та імовірності визначити категорії кожного ризику.

4. Для ризиків із високими та середніми категоріями запропонувати заходи захисту й оцінити їхню ефективність.

5. Повідомити для чого застосовується препарат BIFEN I/T та обмеження щодо застосування.

ChatGPT відповів за кілька секунд наступне.

Завдання 1: Ідентифікація ризиків (небезпеки)

Під час дезінсекції препаратом BIFEN I/T у приміщеннях вантажного судна можуть виникнути такі небезпеки:

1. **Токсичний вплив на персонал** через неправильне використання або недотримання заходів безпеки.

2. **Забруднення харчових продуктів чи води** внаслідок неправильного зберігання або застосування препарату.

3. **Пошкодження майна** через реакцію препарату з матеріалами в приміщеннях.

4. **Недостатня ефективність дезінсекції**, що може спричинити повторне зараження.

5. **Негативний вплив на навколишнє середовище**, якщо залишки препарату потраплять у море.

Завдання 2: Оцінка категорій втрат і ймовірності

На основі опублікованої статистики (зазвичай така інформація містить випадки отруєнь, пошкоджень майна, впливу на довкілля):

1. Токсичний вплив на персонал:

Категорія втрат: середня (серйозні захворювання/травми).

Імовірність: середня (випадки токсичного впливу реєструються регулярно).

2. Забруднення харчових продуктів чи води:

Категорія втрат: велика (потенційна шкода для здоров'я та репутації компанії).

Імовірність: низька (при дотриманні стандартів).

3. Пошкодження майна:

Категорія втрат: низька (матеріальні збитки до \$50 тисяч).

Імовірність: дуже низька.

4. Недостатня ефективність дезінсекції:

Категорія втрат: середня (повторна дезінсекція).

Імовірність: низька.

5. Негативний вплив на довкілля:

Категорія втрат: велика (репутаційні втрати, штрафи).

Імовірність: низька.

Завдання 3: Визначення категорій ризиків

На основі таблиці ризиків з документа:

1. Токсичний вплив на персонал: **середній ризик.**
2. Забруднення харчових продуктів чи води: **середній ризик.**
3. Пошкодження майна: **несуттєвий ризик.**
4. Недостатня ефективність дезінсекції: **низький ризик.**
5. Негативний вплив на довкілля: **низький ризик.**

Завдання 4: Заходи захисту для середніх ризиків

Токсичний вплив на персонал:

1. Надати працівникам індивідуальні засоби захисту (рукавички, респіратори).
2. Провести навчання з безпечного використання препарату.
3. Організувати вентиляцію приміщень після дезінсекції.

Очікуваний результат: зменшення ймовірності до низької категорії.

Забруднення харчових продуктів чи води:

1. Видалити або герметично упакувати харчові продукти перед початком обробки.
2. Використовувати захисні матеріали для покриття обладнання, яке контактує з продуктами.

Очікуваний результат: зниження втрат до низької категорії.

Завдання 5: Препарат BIFEN I/T

Призначення: Препарат використовується для боротьби з широким спектром комах-шкідників, включаючи тарганів, мурах, кліщів, клопів тощо. Застосовується у житлових і громадських приміщеннях, включаючи судна.

Обмеження щодо застосування:

1. Не застосовувати у присутності людей та тварин.
2. Уникати прямого контакту з харчовими продуктами та водою.
3. Забезпечити достатню вентиляцію після обробки.

Наведений приклад демонструє здатність штучного інтелекту швидко та ефективно обробляти великий обсяг інформації для підвищення результативності управління ризиками на морських судах.

У випадках залучення сторонніх компаній або осіб для виконання суднових операцій у практиці кожен із учасників оцінює ризики самостійно [7]. При цьому неминуче застосовуються різні процедури оцінки ризиків, а ризики оцінюються без врахування взаємовпливу дій учасників. Для підвищення якості оцінки ризиків у спільних діях

учасників доцільно використовувати їхні спільні бази даних, як запропоновано в роботі [7]. Також для суміжних учасників можна застосовувати статистику щодо аварій на морі, наприклад щорічні огляди морських аварій і інцидентів, які публікує European Maritime Safety Agency [8]. У цьому випадку штучний інтелект стає незамінним.

Розділ 9 ISM Code вимагає, щоб система управління безпекою забезпечувала передачу в офіс судноплавної компанії повідомлень про невідповідності, нещасні випадки та небезпечні ситуації, а також їх розслідування й аналіз з метою підвищення безпеки та запобігання забрудненню. Також необхідно встановити процедури для виконання коригувальних дій, зокрема заходи, спрямовані на запобігання повторенню таких випадків.

З появою в офісі судноплавної компанії достатньої кількості інформації використання штучного інтелекту для аналізу стає актуальним. Для оцінки, наскільки штучний інтелект дозволяє підвищити якість аналізу та рекомендацій щодо поліпшення безпеки, доцільно провести подальше дослідження.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Gorb Sergey, Gorb Alex. Measuring risk; a practical approach. //Seaways. – 2013. – March. – P. 11 – 14.
2. Горб С.И., Горб А.С. Оценка рисков в техническом менеджменте судов. //Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2012. – Вып. 18. – Одесса: ОНМА. – С. 13 – 22.
3. Горб, С., Горб, А. Бег на месте? Оценки рисков в судоходных компаниях // Порты Украины. – 2012. – № 7. – С. 30 – 32.
4. International Standard Classification of Occupations: ISCO-08 /International Labour Office – Geneva: ILO, 2012. - 420 p.
5. Кодекс з підготовки і дипломування моряків та несення вахти (Кодекс ПДНВ), прийнятий 07.07.1995, із змінами.
6. Довідник кваліфікаційних характеристик професій працівників. – Вип. 67 "Водний транспорт". Розділ "Морський транспорт". Затверджено наказом Мінтрансу України від 10.12.2001, № 863.
7. Сагайдак, О.І., Шахов, А.В. Модель оцінки ризиків усіх учасників операції швартування за допомогою ІТ технологій. //ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2022: збірник матеріалів III міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 8 грудня 2022 р. – Київ: КІВТ Державного університету інфраструктури та технологій. – С. 73 – 77.

8. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024. Lisbon: European Maritime Safety Agency, 2024. – 66 p.

Abstract. *During the operation of marine vessels, numerous risks arise, including failures of technical systems, emergency situations, human errors, environmental factors (including weather conditions), ecological threats, violations of healthy lifestyle practices among crew members and cyberattacks. The International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention (ISM Code) requires that "assess all identified risks to ships, personnel and the environment and establish appropriate safeguards".*

An analysis of the actual implementation of regulatory requirements shows that the implementation of these tasks remains unsatisfactory due to administrative and organizational difficulties..

Currently, the most promising hypothesis for significantly improving risk management on vessels is the use of artificial intelligence (AI) tools.

Preliminary application of AI has shown that it can be utilized to automate the creation, adaptation, and completion of both checklists for ship operations and risk assessment forms tailored to specific operational conditions. AI can account for numerous factors, including the type of vessel, nature of the operation, weather conditions, crew qualifications, and equipment status.

For example, an AI chatbot, ChatGPT, was given a prompt regarding disinsection with the BIFEN I/T chemical in residential, public, office, utility, and sanitary premises of a cargo vessel. The task included:

- 1. Identifying risks (hazards) associated with disinsection.*
- 2. Using published statistics on disinsection of office premises to evaluate: the category of damage for each hazard and the probability category for each hazard.*
- 3. Based on the assessments of loss categories and probability, determine the category of each risk.*
- 4. For risks with high and medium categories, propose protective measures and evaluate their effectiveness.*
- 5. Explaining the purposes and limitations of using the BIFEN I/T chemical.*

ChatGPT's response demonstrated the high effectiveness of artificial intelligence for risk assessment on marine vessels.

УДК 614.72:547.381-074:543.544.45

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-43-53

ARTICLE HISTORY

Received 14.05.2024

Accepted 24.05.2024

Журавльов Юрій Іванович¹, Сандлер Альберт Кирилович²,
Карпілов Олександр Юрійович³, Хнйунін Сергій Георгійович⁴
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна^{1,2,3}
Міжнародний гуманітарний університет, Одеса, Україна⁴
ivanovich1zh@gmail.com¹, sa@onma.edu.ua²,
kau.onma@gmail.com³, reg-post@ukr.net⁴

Вдосконалення засобу контролю повітряного середовища у машинному приміщенні при роботі з вуглеводневими речовинами

Zhuravlyov Yuri¹, Sandler Albert², Karpilov Oleksandr³, Khniunin Sergii⁴
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine^{1,2,3}
International Humanitarian University, Odessa, Ukraine⁴
ivanovich1zh@gmail.com¹, sa@onma.edu.ua²,
kau.onma@gmail.com³, reg-post@ukr.net⁴

Improvement of air control means the engine room when working with hydrocarbon substances

Резюме. Обґрунтовано схематехнічне рішення засобу контролю рівня забруднення повітря суднових машинних приміщень шкідливою речовиною акролеїном. У запропонованому пристрої забезпечена більш адекватна локалізація появи акролеїна та перетворення параметрів газового середовища у зміни інформаційного сигналу, а також компенсація впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику акролеїна. Визначені геометричні параметри складового елементу пристрою – фокону.

Summary. A well-founded circuit-technical solution of a means of controlling the level of air pollution in ship's engine rooms with the harmful substance acrolein. In the proposed device, a more adequate localization of the appearance of acrolein and transformation of parameters of the gas environment into changes in the information signal, as well as compensation

for the influence of destabilizing factors on the measuring channel of the acrolein sensor, are ensured. The geometric parameters of the constituent element of the device - the focon are determined.

Охорона навколишнього середовища, природних ресурсів і забезпечення безпеки, у тому числі й екологічної, завжди були одними із пріоритетних завдань будь-якого енергетичного та технологічного процесу. Одним із широко розповсюджених токсикантів навколишнього середовища є акролеїн, який утворюється в процесах згоряння палив і мастил на основі природних вуглеводнів. Акролеїн виділяється в процесі експлуатації двигунів внутрішнього згоряння, газотурбінних установок, парових і водогрійних котлів.

Акролеїн належить до 2 класу небезпеки, має загальнотоксичний, з вираженою дратівною, алергенною, мутагенною дією, пригнічує синтез дезоксирибонуклеїнової кислоти й клітинний розподіл, виявляє цитотоксичну дію. Гранично припустима концентрація акролеїна в атмосферному повітрі $0,03 \text{ мг/м}^3$, референтна концентрація при гострих інгаляційних впливах – $0,0001 \text{ мг/м}^3$, при хронічному інгаляційному впливі – $0,00002 \text{ мг/м}^3$. Високий тиск насиченої пари сприяє швидкому утвору небезпечних концентрацій акролеїна в повітрі машинних приміщень. Його пари викликають поразки дихальних шляхів, так навіть після видужання людини в його організмі залишаються незникаючі радіологічні й функціональні порушення. По характеру дії на організм людини акролеїн відносять до групи канцерогенних речовин.

Для розширення аналітичних можливостей встановлення реальної концентрації акролеїна в повітрі машинних приміщень при оцінці ризиків здоров'ю необхідно контролювати вміст акролеїна на рівні референтної концентрації.

Така задача з достатньою точністю розв'язується у лабораторних умовах методом газової хроматографії, чи методом, який поєднує газову хроматографію та мас-спектрометрію. Лабораторні дослідження такого роду забезпечують високу вірогідність та селективність вимірювань. Але прилади для аналізу надто коштовні, мають великі ваго-габаритні показники, вимагають великих витрат на технічне обслуговування та експлуатацію виключно висококваліфікованими фахівцями.

Існуючі портативні засоби контролю вмісту акролеїну в умовах впливу дестабілізаційних експлуатаційних чинників демонструють значне відставання якості вимірювань від лабораторних аналогів [1 – 3].

У зв'язку із цим актуальним завданням є розробка мобільного засобу помірної вартості, який забезпечить підвищення вірогідності процесів вимірювання концентрації акролеїна у широкому діапазоні за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання.

Для пошуку шляхів поліпшення метрологічних характеристик пристроїв контролю акролеїну були проаналізовані конструкції найпоширеніших вимірювальних перетворювачів.

Відомим є волоконно-оптичний датчик газового аналізу, що складається з основи, віддзеркалюючого шару, основного світловоду, чутливих світловодів, мультиплексора/демультиплексора та розгалужувача [4]. Конструкція приладу являє собою статичну конструкцію без спроможності модифікації, що суттєво обмежує спроможності поширення діапазону вимірювань. Пристрій не є інваріантним до температурного впливу, бо відсутня термокомпенсація коливань температури зовнішнього середовища та контрольованої газової суміші. Необхідність обробки основного та чутливих світловодів з надзвичайно високою якістю для уникнення створення умов для появи паразитної модуляції обумовлює неприйнятну для портативних пристроїв вартість. Теж саме стосується і необхідності наявності складної системи підтримки геометрії оптичного каналу тунельного зв'язку основного та чутливості світловодів.

Найбільш близьким за технічною сутністю та результатом, що досягається, до рішення задачі вдосконалення датчику акролеїну, є волоконно-оптичний датчик газового аналізу. Датчик складається з джерела випромінювання, світлофільтрів, конденсору, діафрагми, модулятора, вимірювальної та порівняльної камер, лінзи та фотоприймача [5].

Складність конструкції, необхідність операцій взаємного юстирування оптичних елементів та заходів щодо підтримки чистоти оптичних поверхонь суттєво збільшує вартість приладу та його обслуговування. Відсутність термокомпенсації коливань температури зовнішнього середовища та контрольованої газової суміші та вплив на результати вимірювання неідентичності вимірювальної та порівняльної камер негативно впливають на вірогідність вимірювань. А велика кількість оптичних сполучень створює умови для появи паразитної модуляції, що певним чином погіршує метрологічні характеристики приладу.

Мета дослідження – створення волоконно-оптичного датчику акролеїна, обґрунтованої вартості, спрощеної конструкції з ідентичних елементів, у якому мінімальна кількість оптичних з'єднань, відсутня

залежність від стану зовнішнього середовища та контрольованої газової суміші, та одночасно збережені високий рівень чутливості та швидкодія пристроїв відомих типів.

Науково-технічне завдання, яке створено запитом практики, вирішується тим, що пропонується волоконно-оптичний датчик акролеїна складається з джерела інфрачервоного випромінювання, фотоприймача, оптичного фільтра, світловодів та фотоприймача. Відмінність датчика полягає у тому, що джерело випромінювання сполучене з двобічним оптичним розгалужувачем, первинна гілка якого містить оптичний фільтр та вимірювальний трубчатий світловод та вкритим віддзеркалюючим шаром торцем. Вторинна гілка містить контрольний світловод та оптичний фокон для сполучення світловоду з фотоприймачем. Обидві гілки розгалужувача сполучені з біметалевою пластиною.

Схематичне рішення пропонуваного датчику пояснюється кресленням (рис. 1).

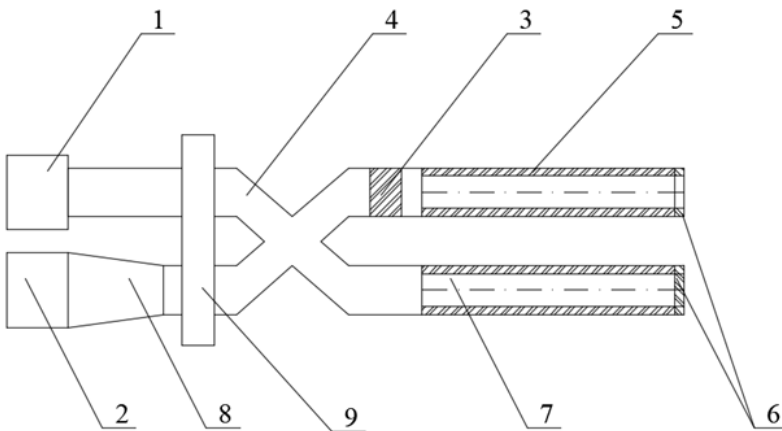


Рис. 1. Волоконно-оптичний датчик акролеїна: 1 – джерело інфрачервоного випромінювання; 2 – фотоприймач; 3 – оптичний фільтр; 4 – оптичний розгалужувач; 5 – вимірювальний трубчатий світловод; 6 – віддзеркалюючий шар; 7 – контрольний світловод; 8 – фокон; 9 – біметалева пластина

Первинна гілка містить оптичний фільтр 3, сполучений з вимірювальним трубчатим світловодом з вкритим віддзеркалюючим шаром торцем 5. Трубчатий світловод дозволяє збільшити зону

контакту оптичної поверхні та газового середовища при збереженні необхідного одномодового режиму роботи. Вторинна гілка розгалужувача містить контрольний світловод 6, торець якого також вритий віддзеркалюючим шаром, та оптичний фокон 7 для сполучення з фотоприймачем 2.

Світловоди первинної та вторинної гілок жорстко сполучені з біметалевою пластиною. Віддзеркалюючий шар на торцях вимірювального та контрольного світловодів служить для відбивання модульованого та первинного випромінювання. Тим самим скорочується довжина вимірювальної лінії та зникає необхідність застосування прохідних вимірювальної та порівняльної камер. Оптичний фільтр дозволяє виділити найбільш доцільну довжину хвилі, на якій проходить поглинання акролеїну. Застосування оптичного фільтру унеможливує вплив інших складових газової суміші. Оптичний фокон дозволяє виконати більш точне сполучення світловода та активної ділянки фотоприймача без додаткового юстирування. Біметалева пластина служить для створення попереднього вигину світловодів. Створений вигин ініціює додатковий витік випромінювання за межі світловода. При зростанні температури контрольованого середовища вигин пластини та попередньо створені втрати змінюються. Таким чином відбувається автоматичне коригування інформаційного сигналу відповідно до температурного впливу.

Подальша обробка випромінювання дозволить отримати електричний сигнал який буде пропорційний величині концентрації контрольованого газового середовища.

При появі з внутрішнього боку вимірювального світловоду акролеїну відбувається порушення умов повного внутрішнього відбивання світла, яке виникає як відклик на тунельне перекачування випромінювання з світловоду назовні [5, 6]. Порушення умов повного відбивання світла у вимірювальному світловоді знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності випромінювання, яке відбувається від віддзеркалюючого шару. Випромінювання повертається крізь розгалужувач до фотоприймача, де здійснюється реєстрація інформаційного сигналу [7 – 9]. Для вдосконалення властивостей приладу можуть бути застосовані альтернативні скломатеріали [10].

У статичному режимі (режим калібровки), тобто у відсутності газового середовища відмінного від атмосферного повітря, у джерелі випромінювання генерується випромінювання, яке крізь розгалужувач,

надходить до вимірювального та контрольного світловодів. У світловодах відбувається зменшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить скрізь них, яке обумовлене затуханням у матеріалі світловодів під впливом експлуатаційних факторів. Інтенсивність випромінювання, що повертається до фотоприймача, фіксується і запам'ятовується як поправка.

У динамічному режимі (занурення у контрольоване газове середовище) при появі з внутрішнього боку вимірювального світловоду акролеїну відбувається порушення умов повного внутрішнього відбивання світла, яке виникає як відклик на тунельне перекачування випромінювання з світловоду назовні. Порушення умов повного відбивання світла у вимірювальному світловоді знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару.

Інтенсивність поглинання випромінювання акролеїном доцільно характеризувати в одиницях молярного коефіцієнта поглинання ε і УФ-спектр представляти у формі $\varepsilon = f(\lambda)$. Величина ε в електронних спектрах органічних молекул змінюється в дуже широкому інтервалі значень ($0 \dots 10^5$) і для зображення абсорбційної кривої в широкому спектральному діапазоні доцільно на осі ординат переходити на логарифмічну шкалу. Крива $\lg \varepsilon = f(\lambda)$ дає можливість наочно й з однаковою точністю представити на одному графіку ділянки спектра, що відрізняються по інтенсивності на кілька порядків (рис. 2) [11].

Аналіз залежності (рис. 2) вказує на те що найбільшою мірою, яка відповідає розв'язанню задачі газоаналізу у машинних приміщеннях, є обрання довжини хвилі випромінювання ~ 2 мкм.

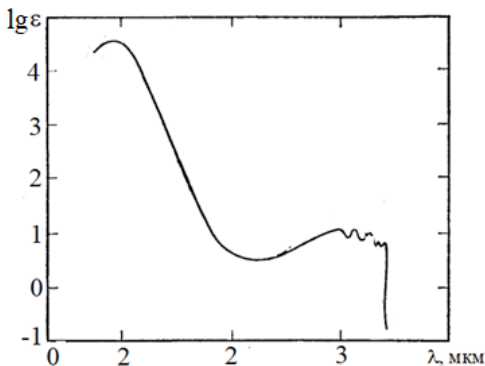


Рис. 2. Спектр поглинання акролеїну

Після цього, змінене за інтенсивністю випромінювання, відбивається від віддзеркалюючого шару та крізь відповідну гілку розгалужувача надходить до фотоприймача. У фотоприймачі рефлектометрі відбувається постійний контроль інтенсивності випромінювання.

Інтенсивність зареєстрованої частки світла буде пропорційна величині вимірюваного параметра газового середовища.

Як правило, фокони між тривимірними оптичними хвильоводами являють собою звуження тільки одного поперечного розміру хвильоводу в площині підложки хвильоводу (рис. 3).

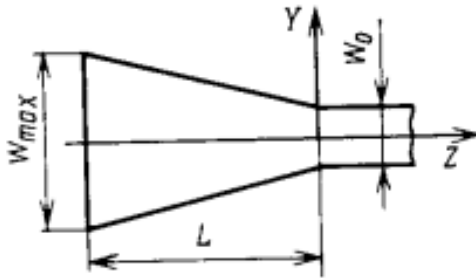


Рис. 3. Хвильоводний фокон

У фоконі зміна поперечного перерізу хвильоводу приводить до зв'язку хвильоводних мод один з одним і з модами випромінювання. В одномодових хвильоводах виникає зв'язок основної моди з модами випромінювання, і вона втрачає частину своєї потужності на випромінювання з хвильоводу. У багатомодових хвильоводах додатково виникає обмін потужністю між модами в процесі їх перетворення у фоконі. Потужність основної моди при цьому втрачається на генерацію паразитних мод і на випромінювання в прилягаюче середовище.

Аналіз фоконів на основі чисельного розв'язку рівнянь зв'язаних хвиль показує, що, як і у випадку хвильоводного переходу між тривимірними хвильоводами, втрати потужності через перетворення мод у моди вищого порядку й моди випромінювання можуть бути суттєво зменшені при збільшенні довжини хвильоводної структури L до величини $(10^3 \dots 10^4)\lambda$.

Аналіз модового зв'язку у фоконих із плавним профілем дозволив встановити їхню оптимальну форму та співвідношення розмірів, що

забезпечують мінімальні втрати на перетворення мод при коефіцієнті передачі потужності понад 90 %. Умова адиабатичності фокона, при якій втрати на перетворення основної моди у вищі моди надмалі, полягає в тому, що у всіх точках уздовж осі фокона кут Θ , утворений дотичною до поверхні рупора і його віссю в будь-якій точці на осі z , є

$$\Theta = a\lambda_b/2W, \quad (1)$$

де $\lambda_b = \lambda/n^*$ – довжина хвилі в оптичному хвилеводі для локальної моди нижчого порядку з ефективним показником заломлення n^* у будь-якій точці осі z ; W – локальна ширина фокона в тій же точці; $a \leq 1$ – постійна.

Фізичний зміст співвідношення (1) полягає в тому, що для усунення перетворення мод і втрат на випромінювання стінки фокона повинні розширюватися повільніше дифракційного розширення лучка для кожного значення на осі z .

З оглядом на умову (1) та те, що $2\Theta = |dW/dz|$, можна зазначити що найбільш доцільним є застосування параболічної форми фокону

$$W(z) = (2a\lambda_g |z| + W_0^2)^{0.5}, \quad (2)$$

де $W_0 = W(z=0)$.

Довжина параболічного рупора, при досить великих значеннях W_{\max} ($W_{\max} \gg W_0$), може бути визначена як

$$L = \frac{W_{\max}^2}{2a\lambda_g}. \quad (3)$$

Розрахунки втрат, обумовлених перетворенням мод у фоконних структурах, показує, що для фокону параболічної форми верхня межа втрат потужності, що вводиться до фокону, визначається величиною $(a/4)^2$. На практиці може бути доцільною апроксимація параболічної форми фокона трьома лінійними секціями, уписаними в параболу. У цьому випадку може бути отриманий коефіцієнт передачі потужності рупорної структури, близький до розрахункового.

При однаковій довжині фокону параболічна форма вносить менші втрати й дозволяє на практиці одержувати для основної моди коефіцієнт передачі потужності понад 90 %. Тому її застосування є більш доцільним ніж лінійної форми.

Порівняння рупорних структур різної форми показує, що у фоконі експонентної форми втрати оптичної потужності можуть бути ще менші. З (2) і (3) видно, що необхідна для виконання умови (1) довжина фокону значно зростає зі збільшенням перепаду поперечних розмірів

хвилеводів, що з'єднуються. Тому слід застосовувати фоконні структури з $W_{\max} < 50$ мкм [12].

Запропоноване схемотехнічне рішення волоконно-оптичного датчику акролеїну завдяки застосуванню оптичних елементів забезпечить такі складові технічного ефекту:

більш адекватну локалізацію появи акролеїна та перетворення параметрів газового середовища у зміни інформаційного сигналу;

компенсацію впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику акролеїна;

можливість створення розгалуженої мережі контролю газового середовища в особливих умовах;

підвищення якості функціонування за рахунок використання матеріалів з близьким коефіцієнтом теплового поширення та обрання раціональної схеми модуляції опорного випромінювання;

пожежевибухобезпечність при застосуванні.

Таким чином запропоновано нове схемотехнічне рішення датчика визначення концентрації акролеїна у суднових машинних приміщеннях. На відміну від існуючих, запропоноване схемотехнічне рішення спроможне значним чином збільшити робочий діапазон та інваріантність до експлуатаційних факторів вимірювального засобу. Впровадження нового датчику дозволить забезпечити умови для захисту здоров'я екіпажу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Katz, S. H., E. J. Talbert. Table 3. Intensities of odors versus concentrations in parts per million // Intensities of Odors and Irritating Effects of Warning Agents for Inflammable and Poisonous Gases. – Washington, D.C.: U.S. Bureau of Mines, U.S. Dept. of Commerce, 1980. – P. 14.

2. Патент РФ № 2556294, МПК G01N 30/02 (2006.1). Способ определения концентрации акролеина в атмосферном воздухе методом высокоэффективной жидкостной хроматографии/ Н. В. Зайцева, Т. С. Уланова, Т. Д. Карнажицкая, Е. О. Заверненкова; заявитель и владелец патента Федеральное бюджетное учреждение науки "Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровьем населения". – 2014114334/28. – заявл. 10.04.2014. – опубл. 10.07.2015, бюл. № 19. – 5 с.

3. Сандлер, А. К., Никольский, В. В., Хнюнин, С. Г. Использование волоконно-оптических устройств для предотвращения техногенных катастроф на судах // Автоматизация судовых технических средств. – 2004. – Вып. 9. – Одесса: ОНМА. – С. 82 - 90.

4. Патент України № 78611, МПК (2011) G01M 11/02 (2006.1). Волоконно-оптичний газоаналізатор/ Заявники та володарі патенту: Сандлер, А.К., Цюпко, Ю.М. – u201210906. – заявл. 18.09.2012. – опубл. 25.03.2013, бюл. № 6. – 3 с.

5. Кравченко, О. М. Підвищення селективності газового аналізу при вимірюванні концентрації аміаку // IV науково-практична конференція студентів та аспірантів "Погляд у майбутнє приладобудування". – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – С. 214.

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

7. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.

8. 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.

9. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Энергетика судна: эксплуатация та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277 - 279.

10. 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.

11. Иоффе, Б. В., Костиков, Р. Р., Разин, В. В. Физические методы определения строения органических молекул. – Л.: Изд. Ленинград. Ун-та, 1976. – 344 с.

12. Семенов, А. С., Смирнов, В. Л., Шмалько, А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.

Abstract. *One of the directions that determine the improvement of the quality and reliability of information systems for monitoring the state of the air environment in the ship's engine room 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 controlled environment. The most effective system for monitoring the state of the air environment is a system with methods of organization of measurements based on individual observation of changes in the composition of the air mixture during operation through measurements 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 corresponding gas analysis sensors. The goal of the work is to introduce the newest means of gas analysis to prevent the negative impact of dangerous substances on the health of the crew. The object of research is the processes of formation and transformation of the measuring signal in the means of gas analysis of the state of the air mixture in the ship's engine room. The subject of the research is fiber-optic means of measuring the concentration of the dangerous substance acrolein. It is proposed to solve the given problem due to the introduction of a new fiber-optic sensor. The difference of the sensor lies in the fact that the radiation source is connected to a two-way optical splitter, the primary branch of which contains an optical filter and a measuring tubular light guide, and the end is covered with a reflective layer. The secondary branch contains a control light guide and an optical focon for connecting the light guide to the photoreceptor. Both branches of the splitter are connected to a bimetallic plate.*

The creation of a fiber-optic sensor of the proposed design will make it possible to obtain 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 air condition in the machine room.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65

ARTICLE HISTORY

Received 05.09.2024

Accepted 18.09.2024

Заблоцький Юрій Вікторович¹, Будашко Віталій Віталійович²,
Сагін Арсеній Сергійович³,
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
yurzpost1966@gmail.com¹, bvv@te.net.ua², saginarseniy@gmail.com³

Забезпечення технологічних операцій зі зрідженим природним газом під час його видобутку в морських прибережних акваторіях

Zablotskyi Yurii¹, Budashko Vitalii², Sagin Arsenii³
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
yurzpost1966@gmail.com¹, bvv@te.net.ua², saginarseniy@gmail.com³

Ensuring technological operations with liquefied natural gas during its production in coastal sea water areas

Резюме. Визначено, що розробка великих газових родовищ на морському шельфі стикається з високими витратами та технічними викликами. Як варіант розв'язання цих проблем впроваджують автономні плавучі заводи зрідженого природного газу. Спорудження подібних заводів найбільш доцільно виконувати за модульною стратегією побудови, відповідно до якої більша частина робіт виконується на заводі, а подальша збірка готових модулів відбувається безпосередньо на морських платформах, що забезпечують видобуток газу в морських прибережних акваторіях та його подальше транспортування суднами-газовозами.

Summary. It was determined that the development of large gas fields on the sea shelf faces high costs and technical challenges. Autonomous floating liquefied natural gas plants are being implemented as a solution to these problems. The construction of such plants is most expedient to be carried out according to the modular construction strategy, according to which most of the work is carried out at the plant, and the subsequent assembly of ready-

made modules takes place directly on marine platforms that ensure gas production in coastal sea areas.

Сьогодні газовидобувна промисловість активно почала освоювати морський шельф. Наразі розробка великих морських родовищ газу ведеться в таких регіонах, як Північне море, Мексиканська затока, Австралія, Малайзія та Індонезія. Однак будівництво заводів, що забезпечують зрідження газу безпосередньо в містах його видобутку, вимагає значних капіталовкладень, зокрема в морські трубопроводи якими зріджений природний газ (ЗПГ) постачатимуся на берегові розподільні станції [1 - 3]. Віддаленість багатьох родовищ від берегової інфраструктури, складність будівництва морських платформ зі зрідження газу, необхідність прокладення підводних трубопроводів і сховищ знижують рентабельність подібних проєктів [4 - 6].

Як розв'язання цієї проблеми найбільші компанії-розробники пропонують використовувати автономні морські заводи ЗПГ (LNG Floating Production Storage and Offloading – LNG FPSO). Ці плавучі комплекси є суднами або баржами, оснащеними системами для видобутку, очищення, осушення та зрідження газу, а також вантажними приміщеннями для зберігання ЗПГ. Вони також обладнані системами для відвантаження зрідженого газу на судна-газовози. Плавучі комплекси можуть розташовуватись безпосередньо над родовищем, що дозволяє уникнути необхідності прокладання довгих підводних трубопроводів і мінімізувати витрати на інфраструктуру.

Такий підхід є особливо актуальним в умовах сучасних кліматичних та економічних викликів. Плавучі заводи проєктуються з урахуванням стійкості до екстремальних погодних умов, включаючи шторми та урагани, що важливо для їхньої експлуатації в різних регіонах світу [7 - 9].

На сьогодні існує більш ста перспективних проєктів плавучих заводів із продуктивністю від 1 млн. т ЗПГ на рік і більше. Крім газових родовищ, розглядаються проєкти зі зрідження попутного нафтового газу на нафтових родовищах із високим газовим фактором. Великі компанії, такі як Shell, Air Products, FLEX LNG, SBM Offshore-Linde, активно пропонують свої рішення для будівництва плавучих заводів.

Технологічні лінії цих проєктів варіюються за продуктивністю від 1,0 ... 4,5 млн. т ЗПГ на рік. Незважаючи на успішну експлуатацію на протязі понад 40 років подібних за технологією наземних заводів, плавучі комплекси стикаються з рядом унікальних технічних та технологічних викликів, пов'язаних із забезпеченням надійності та безпеки в морських умовах. Плавучі заводи зі зрідження природного

газу висувають жорсткіші вимоги до безпеки через щільне розташування виробничої зони, вантажних приміщень та зони для персоналу. Простір для розміщення обладнання на плавучому заводі значно менший в порівнянні з наземними об'єктами. Оптимальні конструкційні рішення мають бути зосереджені на мінімізації розмірів та ваги обладнання. Воно повинно бути стійким до руху судна і відповідати нормативно-технічній документації, яка регламентує об'єкти, що розміщені на суші [10, 11]. Одним із важливих завдань у проектуванні та будівництві плавучих заводів ЗПГ є успішна інтеграція надпалубних споруд (переробних установок та основних виробничих систем) із корпусом судна та його загальносудновими системами [12 - 14].

Будівництво плавучих заводів має здійснюватися за модульним принципом, із мінімальною кількістю одиниць обладнання. Модульний підхід сприяє зменшенню капітальних витрат та забезпечує високу якість виробництва. Саме судно і комплекс надпалубних споруд можуть будуватися паралельно, що скорочує загальний час створення плавучого заводу на місяці.

Процеси виробництва, зберігання та відвантаження ЗПГ та іншої продукції мають відповідати суворим нормам безпеки. Технологічні установки повинні бути максимально безпечними та експлуатуватися з мінімальною кількістю обслуговуючого персоналу.

Одним із головних завдань під час експлуатації плавучих об'єктів, що забезпечують видобуток, зберігання та транспортування ЗПГ, є боротьба з ефектом "слошингу" (розплескання) рідини. Плавучі судна повинні бути спроектовані таким чином, щоб вільні коливання рідини під час виробництва та поступового заповнення вантажних приміщень не пошкоджували їх. При цьому мають бути передбачені вантажні приміщення для зберігання зріджених вуглеводневих газів і можливості їх відвантаження на судна [15, 16]. Таки приміщення повинні бути різних типів і об'ємів, оскільки склад газу може змінюватися залежно від родовища.

Для завантаження ЗПГ на судна-газовози за схемою «борт-о-борт» розроблені системи, що використовують шарнірний завантажувальний рукав і гнучкий криогенний трубопровід. Відвантаження "борт-о-борт" можливе лише за умовою спокійного моря. Розробники подібних технологій також пропонують жорсткі системи відвантаження, що дозволяє здійснювати перекачування ЗПГ в складніших погодних умовах.

Під час детального опрацювання проектів стикаються зі складними технічними проблемами. Одна з них полягає в поєднанні на

обмеженому просторі технології видобутку, підготовки, зрідження, зберігання та морського транспортування ЗПГ, одночасно узгоджуючи всі нормативні документи та технічні регламенти, а також дотримуватись вимог безпеки. Умови експлуатації судна передбачають його рухливість, що виникає під час хвилювання моря. Рух судна може призвести до слошингу ЗПГ або нерівномірного його розподілу в елементах вантажної системи, що знижує надійність роботи установок [17, 18]. Ефект слошингу ЗПГ у мембранних танках під час хитамиці може бути зменшений за допомогою посилення стінок, зміни геометрії танків та встановлення центральної поздовжньої перегородки, яка також виконує роль додаткової опори для надпалубних споруд [1, 19].

З останнього десятиліття компанії-розробники проводили порівняльний аналіз технологічних процесів зрідження, придатних для плавучих заводів ЗПГ. Відбувалися спроби адаптувати відомі великотоннажні технологічні процеси до умов роботи на морі, а також досліджувалися існуючі процеси, пов'язані з малотоннажним виробництвом ЗПГ. У процесі систематизації знань та досвіду експлуатації різних технологій виробництва ЗПГ було визначено основні критерії вибору технології зрідження газу: простота в експлуатації, мінімальна залежність від погодних умов, можливість швидкого запуску та зупинки, збереження ефективності процесу в широкому діапазоні температур довкілля, висока енергоефективність, адаптивність до зміни продуктивності, гарна пристосованість до зміни складу сировинного газу піл час переведення виробництва з одного родовища до іншого, мінімальна необхідність роботи з потенційно небезпечними холодоагентами [3, 20].

Якщо розглянути проекти плавучих заводів, які вже прийняті до виробництва, або такі, що перебувають на стадії впровадження, можливо визначити, що лідируючу позицію серед технологічних процесів зрідження займає азотно-детандерний цикл – азотний холодильний цикл із двома детандерами, де застосування другого детандера на нижчому температурному рівні підвищує термодинамічну ефективність процесу завдяки зменшенню різниці температур у процесі переохолодження ЗПГ.

Азотний холодильний цикл має переваги в морських умовах – перш за все – швидкий запуск і зупинка, мала кількість обладнання, простота схеми та забезпечення безпеки за відсутності вуглеводневих холодоагентів. Азотний цикл дешевший порівняно з циклом на змішаному холодоагенті, а його декілька нижча ефективність компенсується простішою технологією. Крім того, технологічне обладнання азотно-детандерного процесу зрідження піддається

модульному конструюванню та виготовленню завдяки компактним розмірам і відносно невеликій кількості елементів.

За останні роки в індустрії ЗПГ з'явилися нові плавучі регазифікаційні установки – Floating Storage and Regasification Unit (FSRU). Це пов'язано з високою вартістю берегових територій та посиленими екологічними вимогами в прибережній зоні. Розміщення приймальних терміналів на морі дозволяє віддалити об'єкти ЗПГ від населених пунктів і скоротити терміни будівництва терміналів.

Переваги плавучих приймальних терміналів включають: мінімальний вплив на прибережну екологію, високий рівень безпеки, можливість будівництва судна та монтажу надпалубних установок на одній верфі, зниження капітальних витрат у порівнянні з береговими терміналами, можливість переміщення терміналу, вибір оптимального місця для прокладання трубопроводів з урахуванням існуючої берегової інфраструктури [21, 22].

Плавучий приймальний термінал завантажує ЗПГ з танкерів у свої резервуари, а бортова регазифікаційна установка випарює зріджений газ і подає його в підводний газопровід через систему гнучких колекторів.

Сфера застосування FSRU розширюється. На сьогодні чотири сферичних танкера компанії Golar LNG були переобладнані в плавучі приймальні термінали, які базуються біля берегів Бразилії, Арабських Еміратів, Італії та США. Проте у плавучих терміналів залишаються проблеми, схожі з проблемами плавучих заводів ЗПГ, такі як коливання рідини в частково заповнених танках. Найкращим рішенням для цих умов залишаються сферичні та призматичні вантажні танки.

Судна-газовози також стикаються з підвищеною рухливістю під впливом погодних умов на морі, що збільшує навантаження на якірні системи та створює небезпеку під час швартування «борт-о-борт». Одним із рішень є заміна жорстких завантажувальних рукавів на амплітудні системи Amplitude-LNG Loading System (ALLS), які є гнучкими криогенними шлангами та дозволяють проводити розвантаження в більш складних погодних умовах. Ще одним рішенням є збільшення ваги кілю плавучого терміналу, що зменшує його рухливість.

За даними Baird Maritime, компанія Hyundai Heavy Industries у 2023 р. уклала контракт на будівництво нових плавучих терміналів для Норвегії, довжиною 294 м і шириною 46 м, з резервуарами ємністю 170000 м³ ЗПГ.

Протягом останніх двадцяти років у світі спостерігається зростання видобутку природного газу з нетрадиційних джерел. Це газ, що

добувається з щільного пісковика, сланців і вугільних пластів. Розташування родовищ нетрадиційного газу сильно відрізняється від розташування традиційних родовищ вуглеводнів, що може суттєво змінити напрямки світового експорту та імпорту природного газу.

Більш життєздатними з розглядуваних проєктів на даному етапі є проєкти зрідження вугільного газу. На даний момент в Австралії на різних стадіях готовності існує п'ять проєктів зрідження газу з вугільних пластів – чотири великотоннажних і один малотоннажний. Всі вони побудовані за однією моделлю: вугільний метан добувається на континентальному шельфі, зріджується та по газопроводу направляється на берегові термінали ЗПГ. За прогнозами, сумарна продуктивність чотирьох основних заводів ЗПГ з вугільного метану з сьогоденних 16 млн. тонн/рік зросте до 57 ... 58 млн. т/рік.

Серед Європейських країн польська компанія LNG-Silesia спільно з американськими партнерами в даний час приступила до реалізації проєкту малотоннажного виробництва ЗПГ з вмістом метану 97 % з вугільного газу продуктивністю 3 тис. т/рік.

Незважаючи на безліч нетрадиційних копалин у світі, існує ряд проблем, окрім економічних, з якими стикаються розробники технологій зрідження сланцевого або вугільного газу видобуток якого здійснюється на шельфових родовищах.

Однією з основних труднощів реалізації проєкту ЗПГ з вугільного газу є забезпечення достатньої кількості сировини. Для підтримання однакової продуктивності заводу ЗПГ необхідно в сто разів більше продуктивних свердловин на метан-вугільному родовищі, ніж на традиційному. За попередніми оцінками, для забезпечення заводу ЗПГ з продуктивністю 1,5 ... 4,0 млн. т/рік. протягом 20 років може знадобитися близько 3000 свердловин.

Вугільний метан добувається з свердловин за умово. низького тиску та потребує додаткової компресії для подачі по трубопроводу на завод ЗПГ. Вугільний газ відноситься до сильно збіднених газів, він відрізняється повною відсутністю інших вуглеводнів нормального ряду, які часто суттєво підвищують економіку ЗПГ-проєкту. Відсутність легких вуглеводневих газів C_{2+} у товарному ЗПГ знижує його теплотворну здатність. Склад домішок у природному газі вугільних пластів може варіюватися в широкому діапазоні, що вимагає різнопланових інвестицій в установки очистки та осушки газу. Комерційно привабливим вважається газ з вмістом метану не менше 90 %. Наприклад, вугільний природний газ з Австралії містить 98 % метану і зовсім не містить вуглекислого газу, що здешевлює його підготовку до зрідження. Деякі види вугільних газів мають у складі

домішки азоту, кисню, води та вуглекислого газу. Видалення цих домішок з газу вимагає додаткових інвестицій в установки очистки. Типові склади газу з традиційних та метан-вугільних родовищ наведені в табл.

Таблиця
Типовий склад вуглеводневого та вугільного газу

Компоненті газу	Вуглеводневий, %	Вугільний, %
Метан	83,0	95,0
Вуглекислий газ	2,5	3,0
Азот	1,5	2,0
Етан	6,5	Відсутній
Пропан	3,0	Відсутній
Бутан	1,5	Відсутній
Пентани і вище	0,5	Відсутній
Сірководень	1,5	Відсутній

Типова технологічна схема виробництва ЗПГ з газу з вугільних пластів повинна включати наступні процеси: видалення твердих часток з газу, видалення кислотних компонентів, осушування, видалення слідів сірки та сполук ртуті, охолодження та зрідження газу, виділення азоту з зрідженого газу.

У порівнянні з традиційною технологічною схемою заводу ЗПГ, в цьому випадку відсутня установка для видалення важких компонентів та фракціонування. За умовою використання технологічних процесів зі змішаними холодоагентами, компоненти холодоагентів повинні бути імпортовані на плавучий завод. Практично повна відсутність сірководню у вугільному газі значно полегшує процес видалення кислотних компонентів, який, врешті-решт, зводиться до очищення від вуглекислого газу [23, 24].

Видобуток природного газу з вугільних пластів неминуче призведе до зменшення викидів метану в атмосферу, і що набагато важливіше, сприятиме підвищенню безпеки праці на захисті довкілля.

Модульна стратегія спорудження великих виробничих об'єктів, характерна для нафтової промисловості, знаходить застосування в індустрії ЗПГ. Модульність була розроблена під час будівництва шельфових нафтових споруд. Стратегія полягає в тому, що більша частина будівельних робіт виконується на заводі, а подальша збірка готових модулів відбувається безпосередньо на морських платформах.

Завдяки розвитку з середини 10-х років XXI століття будівельної індустрії, зокрема, зростанню продуктивності вантажопідйомних

механізмів та обладнання для транспортування великогабаритних вантажів, модульна стратегія стала можливою також для морських газових об'єктів. Модульна стратегія вже застосовувалася на об'єктах ЗПГ-індустрії під час будівництва в 2022 р. норвезького заводу Snohvit LNG, п'ятої лінії австралійського заводу ЗПГ North West Shelf в 2023 р. та 1-ї лінії австралійського Pluto LNG в 2024 р.

Існує дві основні категорії об'єктів, які використовують модульну стратегію. По-перше, це проекти з сезонними або погодними проблемами, які викликають тривалі періоди простою в будівництві. До погодних проблем належать, наприклад, низькі температури, значний бруд під час сезонної активності підводних течій або збільшення льодового шару в акваторії морських видобувних платформ. По-друге, це проекти з обмеженою площею будівництва, підвищеною вартістю будівельних робіт і необхідністю періодичної ротації персоналу.

Конструкція модулів повинна бути розрахована на транспортування та установку, що рівносильне зміцненню конструкції для експлуатації в сейсмо-небезпечній зоні. Як правило, модулі містять близько 60 % конструкційної сталі, на відміну від 25 %, що використовуються під час будівництва традиційними методами. Це призводить до зростання загальних капітальних витрат. Крім того, через розробку модулів збільшується загальний час проектування. Модульне виконання також суттєво впливає на виконання закупівель, логістику та планування всього ходу робіт. Усі ці фактори повинні враховуватися під час вибору стратегії будівництва плавучих заводів ЗПГ. Тим не менш, модульний принцип може виявитися єдиним правильним рішенням в екстремальних погодних умовах. Зокрема, він повинен стати визначальним при розміщенні об'єктів малотоннажного виробництва ЗПГ.

Як висновки визначимо наступне:

1. Прагнення до зниження негативного впливу на довкілля, що здійснюється з боку морських суден та їх енергетичних установок, є однією з підстав, які сприяють розвитку автономних плавучих заводів зрідженого природного газу.

2. Розміщення подібних заводів доцільно поза дванадцятимильною прибережною зоною, що разом з вантажними операціями дає змогу виконувати технологічні операції з баластними водами та водами, що містять нафту, відповідно до вимог МАРПОЛ.

3. Найбільш ефективною схемою комплектування автономних плавучих заводів зрідженого природного газу є модульна, яка, в

залежності від виробничого завдання, дозволяє виконувати різні операції з видобутку, переробки та перевантаження скрапленого газу.

4. Використання автономних плаваючих заводів зрідженого природного газу також сприяє підвищенню енергетичної безпеки, забезпечуючи більш стійке та безперервне постачання зрідженого природного газу як джерела енергії. Це особливо актуально для віддалених регіонів та районів з обмеженими можливостями зберігання та транспортування.

5. Використання автономних плаваючих заводів в енергетичному комплексі будь-якої країни знижує залежність від традиційної наземної інфраструктури, мінімізуючи витрати на будівництво стаціонарних об'єктів і спрощуючи процес транспортування зрідженого природного газу до кінцевих споживачів. Це сприяє розвитку світової мережі постачання енергоресурсів, підвищуючи гнучкість та оперативність у відповідь на змінні потреби ринку.

6. Модульна структура таких заводів дозволяє гнучко адаптувати обладнання для різних виробничих потреб, що може зменшити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність видобутку та обробки ресурсів. Це сприяє загальній екологічній безпеці та економічній доцільності у морському транспорті та енергетики.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Kolegaev M. O., Brazhnik I. D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 200 - 216.

2. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 120.

3. Сагін, С. В., Матейко, О. В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 148 -156.

4. Сагін, С. В., Матейко, О. В. Особливості інертизації вантажних танків під час перевезення вогнебезпечних речовин // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36 - 49.

5. Petrychenko O., Levynskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96 - 106.

6. Sagin A. S., Zablotskiy Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7 - 8. – P. 14 - 17.

7. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. – 2021. – № 7 - 8. – P. 36 - 43.

8. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport Systems and Technologies*. – 2024. – № 43. – P. 21 - 36.

9. Заблоцький, Ю. В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 12 - 16.

10. Горб, С. И., Горб, А. С. Программное обеспечение для управления активами на судах // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2018. – Вып. 24. – Одесса: ОНМА. – С. 34 - 48.

11. Горб, С. И., Поповський, О. Ю., Будуров, М. І. Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 3 - 16.

12. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7 - 8. – P. 29 - 35.

13. Gorb S. I., Budurov M. I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // *International Review of Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 15(3). – P. 115 - 121.

14. Sagin S. V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference "Scientific research of the SCO countries: Series Synergy and Integration*. – 2019. – P. 139 - 145.

15. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373.

16. Sagin S. V., Kuropyatnik A. A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric

oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 - 71.

17. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021 – Вип. 43. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5 - 17.

18. Горб, С. И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 17 - 34.

19. Побережний, Р. В., Сагін, С. В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 5 - 9.

20. Руснак, Д. Ю., Сагін, С. В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 49 - 54.

21. Сагін, С. В., Куропятник, А. А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 79 - 89.

22. Сагін, С. В., Мадей, В. В., Сагін, А. С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів: наук. - техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 93 - 107.

23. Куропятник, А. А., Сагін, С. В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 72 - 80.

24. Сагін, С. В., Побережний, Р. В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. –техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132 - 141.

***Abstract.** Currently, the gas production industry has actively begun to develop the sea shelf. Currently, large offshore gas fields are being developed in regions such as the North Sea, the Gulf of Mexico, Australia, Malaysia and Indonesia. However, the construction of plants that provide liquefaction of gas directly in the cities of its production requires significant capital investments, in particular, in marine pipelines through which liquefied natural gas will be delivered to coastal distribution stations. The*

remoteness of many fields from the coastal infrastructure, the difficulty of building offshore gas liquefaction platforms, the need to lay underwater pipelines and storage facilities reduce the profitability of such projects. As a solution to this problem, the largest development companies propose to use autonomous marine liquefied natural gas plants. These floating complexes are vessels or barges equipped with systems for extraction, purification, drying and liquefaction of gas, as well as cargo spaces for storage of liquefied natural gas. Floating complexes can be located directly above the deposit, which avoids the need to lay long underwater pipelines and minimize infrastructure costs. The construction of such plants is most expedient to be carried out according to the modular construction strategy, according to which most of the work is carried out at the plant, and the subsequent assembly of ready-made modules takes place directly on marine platforms that ensure gas production in coastal sea areas. The design of the modules must be designed for transportation and installation, which is equivalent to strengthening the structure for operation in a seismically dangerous zone. Modular execution also significantly affects the execution of procurement, logistics and planning of the entire course of work. All these factors should be taken into account when choosing a strategy for the construction of floating LNG plants. The modular principle may prove to be the only correct solution in extreme weather conditions. In particular, it should become decisive when placing objects of low-tonnage production of liquefied natural gas.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-66-76

ARTICLE HISTORY

Received 13.09.2024

Accepted 27.09.2024

Колегаєв Михайло Олександрович¹, Бражнік Ігор Дмитрович²
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
smf@onma.edu.ua¹, ig.brazhnik@gmail.com²

Вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій

Kolegaev Mykhaylo¹, Brazhnik Igor²
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
smf@onma.edu.ua¹, ig.brazhnik@gmail.com²

Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations

***Резюме.** Розглянуті питання щодо вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій. Зазначено, що ефективність експлуатації нафтоналивних суден крім транспортних операцій, визначається технологіями, які використовуються під час підготовки судна до прийому нового вантажу. Однією з таких технологій є інертизація вантажних танків. Метою досліджень було вдосконалення системи інертних димових газів нафтоналивного судна. Встановлено, що суттєве скорочення часу інертизації досягається за рахунок комбінованого використання чотирьох периферійних та одного центрального сопла для введення інертних газів у вантажний танк нафтоналивного судна.*

***Summary.** Considered issues related to the improvement of the process of preparing cargo tanks of oil tankers for cargo operations. It is noted that the efficiency of the operation of oil tankers, in addition to transport operations, is determined by the technologies used during the preparation of the vessel to receive a new cargo. One of such technologies is the inertization of cargo tanks. The aim of the research was to improve the inert flue gas system of the oil tanker. It was established that a significant reduction in the inertization time is achieved due to the combined use of four peripheral and*

one central nozzle for the introduction of inert gases into the cargo tank of an oil tanker.

Ефективність експлуатації суден, що призначені для перевезення сирової нафти та нафтопродуктів, крім транспортних операцій, визначається технологіями, які використовуються під час підготовки судна до прийому нового вантажу. Однією з таких технологій є інертизація вантажних танків, яка передує будь-яким вантажним операціям. У технології управління та контролю процесом інертизації вантажних танків на танкерах існує ряд недоліків. Перш за все до них відносяться: велика тривалість процесу; відсутність технічних засобів інтенсифікації процесу заміщення атмосфери танку; невідповідність вимірів концентрації атмосфери танку на виході реальним значенням усередині вантажного танку [1, 2]. Сукупність цих недоліків неспроможна гарантувати високу ефективність процесу інертизації вантажних приміщень танкера, з цієї причини процес інертизації вантажних танків нафтоналивного судна займає значний час.

Скорочення часу процесу інертизації є затребуваним з економічної точки зору, оскільки для танкерів з дедвейтом понад 50000 т скорочення часу зі стандартних 30 год. до 20 год. може дати річну економію палива (яке використовується для забезпечення роботи генератору інертних газів) до 90 ... 100 тис. \$ США [3, 4].

Модернізація системи інертного газу (ІГ) танкерів передбачає проведення робіт з двох напрямів: конструктивної зміни технології підготовки палива в системі генерування інертних газів та вдосконалення технології інертизації вантажних танків.

Основні принципи роботи системи ІГ на танкерах базуються на спалюванні дизельного палива в генераторі інертних димових газів, який є окремим пристроєм, що не пов'язаний із судновим контуром підготовки палива. Отриманий під час функціонування генератора інертний димовий газ після проведення низки операцій з його очищення та зниження температури спрямовується до вантажних танків [5, 6].

Відповідно до вимог SOLAS технічні показники, за якими ІГ повинні подаватися до вантажних танків нафтоналивних суден визначаються такими значеннями: концентрація кисню в ІГ, що подається, повинна бути не більше 5 %; концентрація кисню у вантажному танку – менше за 8 %; температура інертних газів – менше за 65 °С [7].

Висхідний вимушений рух атмосфери у вантажному танку з його подальшим видаленням з танку викликається дією сили з боку ІГ, що

подається у вантажний танк. Ця сила утворюється через зміну густини багатофазної суміші усередині танка, а також є наслідком взаємопов'язаних між собою процесів перенесення теплоти та передачі маси через різні концентрації ІГ та атмосфери танка. Температурна стратифікація багатофазного потоку, що рухається в суміші з атмосферою танка по висоті вантажного приміщення, також є одним із факторів, що впливають на швидкість заміщення атмосфери усередині вантажного танка [8]. За умовою зміни температури від 20 °С до 50 °С густина повітря змінюється на 10 % від 1,2 кг/м³ до 1,09 кг/м³ [9].

В разі визначення густини інертного газу прийнято враховувати вміст його чотирьох основних компонентів: вуглекислого газу CO₂, парів води H₂O, оксиду азоту NO₂ та кисню O₂. Згідно з [4, 6, 10] вплив температури на густину інертних димових газів можна враховувати як добуток їх густини за нормальних умов на температурну поправку за виразом:

$$\rho_{\text{ІГ}} = \frac{G_{\text{ІГ}}}{V_{\text{ІГ}}} \cdot \frac{273}{273+T} = \frac{1 + \alpha L_0}{22,4(m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{NO}_2} + m_{\text{O}_2}) + 273 + T} \cdot \frac{273}{273+T},$$

де $\rho_{\text{ІГ}}$ – густина інертних димових газів, кг/м³; $G_{\text{ІГ}}$ – загальна кількість інертних димових газів, що утворюються під час спалювання 1 кг палива, кг; $V_{\text{ІГ}}$ – об'єм інертних димових газів, м³; T – температура газів, °С; α – коефіцієнт надлишку повітря; L_0 – теоретична кількість повітря, що необхідна для згорання 1 кг палива, кг/кг; $m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{NO}_2} + m_{\text{O}_2}$, кмоль/кг – молярний вміст в інертних димових газах вуглекислого газу, парів води, оксиду азоту, кисню відповідно.

У роботах [6, 8, 11] показано, що у разі вимушеної конвекції поле течії в замкнутому обсязі перестає залежати від механізмів теплопередачі та поточного поля температур. Цей факт безпосередньо вказує на доцільність використання подачі струменів інертного газу у вантажні приміщення танкера. Основна спрямованість досліджень механізму використання подачі струменів ІГ у вантажний танк судна має бути призначена для розв'язання завдання щодо скорочення часу його інертизації.

Метою дослідження є вдосконалення системи інертних димових газів за рахунок використання нової технології подачі струменів інертного димового газу у вантажні танки нафтоналивного судна.

Основним завданням дослідження є встановлення ступеня впливу параметрів газового потоку (якій утворюється генератором інертних димових газів) на вході в вантажний танк на характер зміни концентрації кисню у атмосфері танку. За кінцевий результат

розв'язання цього науково-прикладного завдання визначено скорочення часу інертизації вантажних приміщень нафтоналивних суден.

Об'єктом дослідження є процес інертизації вантажного танку нафтоналивного судна. Предметом дослідження є система генерування та подачі інертного димового газу.

Під час інертизації вантажного танку подача струменів ІГ повинна бути узгодженою зі потоком повітря, що рухається з невисокими швидкостями всередині жорстких стінок вантажного танку, що обмежують його. Основну зміну динамічні характеристики багатофазного потоку газів та повітря будуть зазнавати у кутових зонах [2, 3]. З цієї причини дуже важливою є подача струменів ІГ саме в ядро висхідного повітряного потоку. У цьому випадку великомасштабні турбулентні вихори в середині вантажного танку призводитимуть до скорочення часу його інертизації.

Дуже важливим питанням є кількість джерел струменів на днище вантажного танку та кут α розкриття їх факелу. Найменші кути розкриття будуть призводити до подовження струменя ІГ та через це збільшувати зону турбулізації ядра потоку повітря за висотою танку. Великі кути впливатимуть на інтенсифікацію процесу тепло- і масо перенесення, особливо в кутових зонах нижньої частини вантажного танку [12].

На стадії експериментального вивчення процесу інертизації вантажного танку за рахунок удосконалення подачі ІГ були використані три технологічні схеми, які показані на рис. 1.

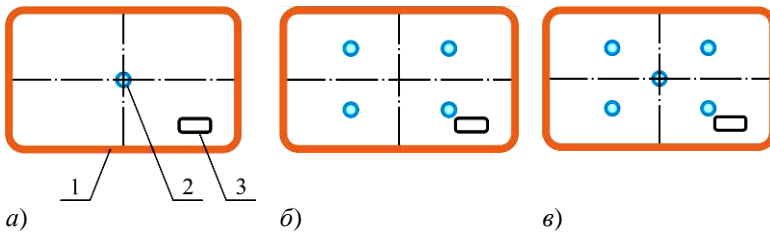


Рис. 1. Схеми подачі ІГ у вантажний танк:

а – перша, б – друга, в – третя схеми; 1 – вантажний танк; 2 – сопло подачі газів (розміщено на днище танку); 3 – вихідний отвір (розміщено у верхній частині танку)

Під час експериментів використовувалося три однакові за пропускною здатністю сопла, але з різними кутами розкриття α конуса факела струменя інертних газів рівними 30° , 60° та 90° (рис. 2).

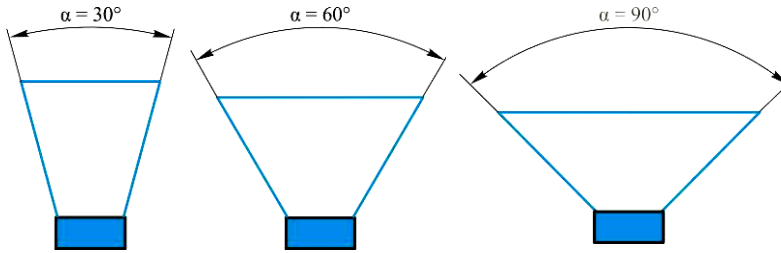


Рис. 2. Подача інертних газів в вантажні танки з різними кутами розкриття факелу

Перша схема (рис. 1, а) містила лише одне джерело струменя з кутом розкриття $\alpha=60^\circ$ (рис. 2, б). Воно розміщувалося в центральній точці днища вантажного танку. Друга схема (рис. 1, б) містила чотири джерела струменів інертних газів, які розміщувалися хрестоподібно на днищі танку. Сопла встановлювалися по діагоналі в чотирьох центрах однакових прямокутних зон днища танку. Їхній кут розкриття для створення конусного факелу струменя становив $\alpha=30^\circ$ (рис. 2, а). Цей кут використовувався з метою виключення взаємного впливу струменів ІГ один на інший під час їх спрямування в об'єм танку. Третя схема (рис. 1, в) була комбінована. Кількість джерел струменів дорівнювала п'яти. На початку процесу подачі ІГ використовувалися чотири джерела, що розміщувалися по кутам танку з кутом розкриття $\alpha=30^\circ$ (рис. 2, а). Під час зниження вихідного значення концентрації кисню в повітрі на тридцять відсотків подача ІГ відбувалася лише з п'ятого – центрального джерела струменя. У ньому використовувалося сопло, що створює кут розкриття конуса факела струменя $\alpha=90^\circ$ (рис. 2, в). З початком роботи центрального сопла всі кутові джерела подачі струменів ІГ відключалися.

Для всіх трьох схем подачі ІГ у вантажний танк було отримано залежність зміни концентрації кисню від часу під час процесу інертизації. Вимірювання проводилися одночасно на різних висотах у шести вантажних приміщень.

Результати порівняння зі стандартною технологією показано на рис. 3. В зв'язку з тим, що під час проведенні експериментів головним завданням був вибір найбільш ефективної схеми подачі ІГ, тривалість роботи газоаналізатора була обмежена періодом о 5 години.

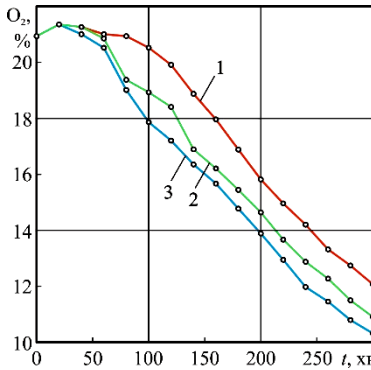


Рис. 3. Зміни концентрації кисню у вантажному приміщенні за різних кутів струменя ІГ: 1 – 60° (стандартна схема); 2 – 30°; 3 – 30° та 90°

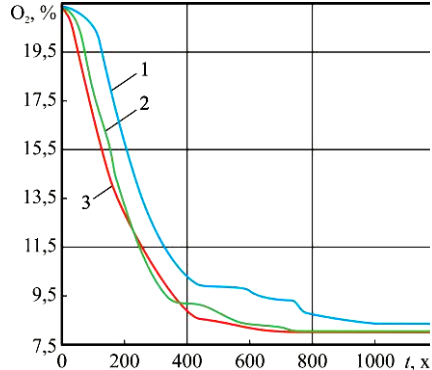


Рис. 4. Зміна концентрації кисню у вантажному приміщенні нафтоналивного судна. Подача ІГ: 1 – стандартна; 2 – удосконалена; 3 – розрахунок

Як свідчать результати, що наведені на рис. 3, якісний характер процесу зменшення концентрації кисню всередині вантажного приміщення у всіх чотирьох випадках залишався практично ідентичним. Це вказує на те, що вплив кута розкриття факела струменя ІГ на характер заміщення атмосфери танка не є основним і що на процес впливає ступінь стратифікації густини багатофазного потоку газів і повітря всередині вантажного приміщення танкера. Результати що наведені на рис. 3, також свідчать, що якість роботи другої технологічної схеми подачі ІГ у порівнянні з першою схемою краще, але найбільше скорочення часу інертизації вантажного приміщення було досягнуто з використанням третьої технологічної схеми. У порівнянні з використанням традиційної подачі ІГ зміни в кращу сторону за інших рівних умов призвели до додаткового зменшення концентрації кисню за той же період інертизації вантажного танка.

Порівняння результатів вимірювань, що описують весь процес зміни концентрації кисню у вантажному приміщенні танкера з використанням удосконаленої та стандартної технології подачі інертного газу показано на рис. 4. Також на рис. 4 наведено дані теоретичних розрахунків (суцільна лінія) процесу інертизації вантажного танка. Експериментальні дані, що показані на рис. 4, були отримані одночасно, коли проводився процес інертизації двох

ідентичних вантажних танків. Подача газу відбувалася за стандартною технологічної схеми (рис. 1, *a*) та з використанням розробленої комбінованої схеми (рис. 1, *в*).

Аналіз наведених результатів показує, що використання удосконаленої подачі ІГ призводило до кількісної, але не якісної розбіжності у змінах часу концентрації кисню усередині вантажного приміщення. Отримана розбіжність між двома експериментальними кривими свідчить про досягнення головної мети досліджень.

Використання вдосконаленої схеми подачі ІГ до вантажних танків призводить до отримання найголовнішого та основного результату – скорочення часу, що витрачається на інертизацію вантажних приміщень танкера перед вантажними операціями. Результати, що наведені на рис. 4 демонструють, що на початку процесу інертизації зміна концентрації кисню відбувається однаково незалежно від способу подачі ІГ. Суттєво розходження між кривими починається через 80 хв. після початку процесу інертизації вантажних приміщень. Залежно від способу інертизації танку кінцева концентрація кисню всередині його простору відрізняється – її значення у разі використання вдосконаленої схеми стає менше, ніж за стандартною. Вихід на стаціонарне значення концентрації кисню у вантажному танку (що дорівнює 8 %), в випадку удосконаленої подачі ІГ спостерігається приблизно через 740 хв. після початку процесу інертизації вантажних танків. Аналогічна величина концентрації за умовою інертизації за стандартною схемою досягається за більший період часу. Її вихід на стаціонарне значення спостерігався приблизно через 1700 хв. після початку процесу інертизації вантажних приміщень.

Під час проходження процесу інертизації температура всередині вантажного приміщення танкера постійно зростає. Процес зміни температури T у часі t за висотою вантажного танку H відображений на рис. 5.

Наведені залежності відповідають чотирьом вимірювальним точкам, які знаходились на різних висотах вантажного танка: 0 (на донній частині танку), $0,25H$, $0,5H$, H (в верхній частині танку).

За аналогією з процесом зміни концентрації кисню всередині танку також спостерігається стабілізація температури атмосфери вантажного приміщення. Результати, що наведені на рис. 5, свідчать, що починаючи з часу рівного 960 хв. температура на всіх вимірювальних рівнях перестає змінюватися і набуває свого стаціонарного значення.

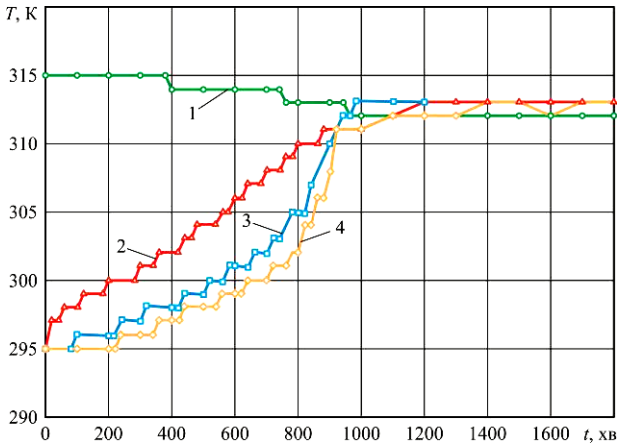


Рис. 5. Зміна температури атмосфери вантажного танка за його висотою H : 1 – 0 (донна частина); 2 – $0,25H$; 3 – $0,5H$; 4 – H (верхня частина)

Під час порівняння результатів вимірювань температури на виході з танку за стандартною та вдосконаленою схемами подачі ІГ було встановлено, що стабілізація температури в останньому випадку також настає раніше. Температурний градієнт, який становить $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, у випадку використання удосконаленої схеми інертизації досягався за час менший на $38,2\%$ порівняно зі стандартною схемою інертизації вантажних приміщень танкера.

Технологія проведення дослідницьких робіт була погоджена з відділом технічної експлуатації та менеджменту судноплавної компанії якої належить судно. Всі дослідження виконувались з забезпеченням вимог MARPOL та SOLAS [13, 14].

Висновки.

1. Використовувана нині технологія інертизації вантажних приміщень танкерів характеризується великою тривалістю часу цього процесу. Для розв'язання цієї проблеми запропоновано підвищити якість процесу інертизації вантажних приміщень танкера за рахунок використання удосконаленої подачі струменів інертного газу.

2. Під час інертизації танку подача струменів інертного газу має бути узгодженою зі структурою потоку повітря, що рухається з невисокими швидкостями всередині жорстких стінок вантажного танку, що обмежують його. Для цього була розроблена комбінована схема подачі інертного газу до вантажного танку судна.

3. Запропонована технологія подачі інертного газу у вантажний танк забезпечує поліпшення процесу інертизації нафтоналивного судна, що відображається в скороченні часу, якій потрібен на його проведення.

4. Під час використання запропонованої вдосконаленої схеми подачі інертних газів у вантажні приміщення судна стабілізація температури всередині танку настає раніше, ніж у разі використання стандартної схеми. Підтвердженням цього є такий факт, що температурний градієнт (який становить $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$) досягався за менший на 38,2 % час в порівнянні зі стандартною схемою інертизації вантажних приміщень танкера.

5. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку способів технічної реалізації розробленої технології залежно від конструкції танкера та технічних характеристик суднової системи інертних газів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Бражнік, І. Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: Науковий журнал. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4 - 11.

2. Бражнік, І. Д. Модернизация процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с помощью системы инертных газов // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: "Технічні науки". – 2019. – Т. 30(69) – № 5. – С. 129 - 133.

3. Малахов, О. В., Колегаєв, М. О., Бражнік, І. Д., Ліхогляд, К. А. Характеристики процесу тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 39 – Одеса: НУ"ОМА". – С. 56 - 68.

4. Anand S., Suresh S., Santhosh Kumar D. Heat Transfer Studies of Supercritical Water Flows in an Upward Vertical Tube // Journal of Heat and Mass Transfer Research. – Semnan: Semnan University Press. – 2019. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 155 - 167.

5. Reif A., Büchner A., Rehfeldt S., Klein H. Outer heat transfer coefficient for condensation of pure components on single horizontal low-finned tubes // Heat and Mass Transfer. – Berlin: Springer, 2019 – Vol. 55. – Iss. 1. – P. 3 - 16.

6. Shervani-Tabar M.T., Parsa S., Ghorbani M. Numerical study on the effect of the cavitation phenomenon on the characteristics of fuel spray // Mathematical and Computer Modelling. – Amsterdam: Elsevier. – 2012. – No 56. – P. 105 - 117.

7. Wong S. F., Dol S. S. Turbulence Characteristics Study of the Emulsified Flow // WSEAS Journal – Transactions on Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 14. – P. 45 - 50.

8. Mohyud Din S. T., Zubair T., Usman M., Hamid M., Rafiq M., Mohsin S. Investigation of heat and mass transfer under the influence of variable diffusion coefficient and thermal conductivity // Indian Journal of Physics. – Calcutta: Springer. – 2018. – Vol. 92. – Iss. 9. – P. 1109 - 1117.

9. Sagin A. S., Zablotskiy Yu. V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7 - 8. – P. 14 - 17.

10. DeWitt D. P., Incropera F. P., Lavine A.S., Bergman T.L. Principles of Heat and Mass Transfer // Chichester: John Wiley and Sons Ltd. – 2012. – 1072 p.

11. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 200 - 216.

12. Malakhov O. V., Kolegaev M. O., Brazhnik I. D., Saveleva O. S., Malakhova D. O. New Forced Ventilation Technology for Inert Gas System on Tankers // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2020. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 2549 - 2555.

13. Горб, С. И., Горб, А. С. Программное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: ОНМА. – С. 34 - 48.

14. Горб, С. И., Поповський, О. Ю., Будуров, М. І. Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса : НУ"ОМА". – С. 3 - 16.

Abstract. *Considered issues related to the improvement of the process of preparing cargo tanks of oil tankers for cargo operations. It is noted that the efficiency of the operation of oil tankers, in addition to transport operations, is determined by the technologies used during the preparation of the vessel to receive a new cargo. One such technology is the inertization of cargo tanks, which precedes any cargo operations. The purpose of the research was to improve the system of inert flue gases by using a new technology for*

supplying jets of inert gas to the cargo tanks of the oil tanker. The main task of the research is to determine the degree of influence of the parameters of the gas flow (which is generated by the generator of inert flue gases) at the entrance to the cargo tank on the nature of the change in air concentration in the entire volume of the tank. The final result of solving this scientific and applied task is defined as a reduction in the time of inertization of cargo spaces of oil tankers. During the experiments, inert gas was supplied to the cargo hold according to three technological schemes. The first contained only one jet source with an opening angle of 60° , which was located at the central point of the bottom of the cargo tank. The second contained four sources of jets of inert gases, which were placed in a cross shape on the bottom of the tank. The nozzles were installed diagonally in the four centers of the same rectangular zones of the bottom of the tank. Their opening angle to create a conical jet flame was 30° . The number of inert gas jet supply sources of the third circuit was five. At the beginning of the inert gas supply process, four sources were used, located at the corners of the tank with an opening angle of 30° . During the reduction of the initial value of the oxygen concentration in the air by thirty percent, the supply of inert gas occurred only from the fifth – the central source of the jet. It used a nozzle that creates an opening angle of the cone of the jet torch of 90° . With the start of the central nozzle, all corner sources of inert gas jets were turned off. It has been proven that this scheme ensures the improvement of the inertization process of the oil tanker, which is reflected in the reduction of the time required for its implementation.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-77-91

ARTICLE HISTORY

Received 05.09.2024

Accepted 18.09.2024

Матейко Олексій Владіславович
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
oleksii.matieiko@gmail.com

Забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

Matieiko Oleksii
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
oleksii.matieiko@gmail.com

Ensuring the process of inertization of cargo tanks of gas carriers

***Резюме.** Надані результати досліджень, щодо забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів. Визначено, що якісне проведення інертизації неможливе без утворення та підтримання у вантажному танку поділяючого шару, який шар попереджує сумішоутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, та виконує функції «поршню» за допомогою якого здійснюється витиснення залишків парів вантажу з вантажного танку. Експериментально встановлені значення тиску нагнітання інертного газу за яким процес інертизації здійснюється за найкоротших час з одночасним забезпеченням суцільності та стійкості поділяючого шару.*

***Summary.** The results of research on ensuring the process of inertization of cargo tanks of gas carriers are provided. It was determined that high-quality inertization is impossible without the formation and maintenance of a dividing layer in the cargo tank, which layer prevents the formation of a mixture between the cargo vapors remaining in the cargo tank and the inert gas, and performs the functions of a "piston" with the help of which the remaining cargo vapors are pushed out of the cargo tank. Experimentally*

determined values of the inert gas injection pressure according to which the inertization process is carried out in the shortest time while simultaneously ensuring the continuity and stability of the dividing layer.

В теперішній час природний газ займає домінуючу позицію серед інших видів палива в багатьох країнах Світу. Природний газ використовується двигунах автомобільного, залізничного та морського транспорту, а також в стаціонарної енергетики та для забезпечення побутових потреб.

Сьогодні природний газ – це товар, що продається в усьому світі, який постачається або в газоподібному стані (по трубопроводних магістралях), або в зрідженому стані (спеціальними морськими танкерами-газовозами). Як правило, основні замовники / споживачі газу знаходяться на великій відстані від його родовищ. У цих випадках метод транспортування зрідженого природного газу (ЗПГ) морськими та океанськими шляхами є більш економічним у порівнянні з трубопроводним. Тому, природний газ у зрідженому вигляді перевозиться морським транспортом. Морські термінали імпорту та експорту ЗПГ розташовані практично повсюдно. Це означає, що ЗПГ доступний практично у будь-якій точці світу [1, 2].

Перевезення природного газу танкерами-газовозами здійснюється у спеціальних ізотермічних ємностях, при цьому газ охолоджується до температури $-160 \dots -165$ °С. Саме за цих умов відбувається перехід газу в рідкий стан з одночасним зменшенням його обсягу до 600 разів. Континентальними лідерами експорту ЗПГ є країни, наведені у табл. 1.

Таблиця 1
Країни-лідери з експорту зрідженого природного газу

Країна	Запаси газу (млрд. м ³) на 01.01.2023	Географічний район
Австралія	1600	Західна Австралія
Катар / Іран	35000	Перська затока
Алжир	3500	Північна Сахара
Нідерланди	2100	Північне море
Венесуела	850	Північна Венесуела
США	2300	Мексиканська затока

Танкери для перевезення ЗПГ транспортують величезну кількість природного газу від терміналів зрідження до терміналів регазифікації, які розташовані в морських портах по всьому світу. У цих портах відбувається регазифікація газу та його подальша доставка споживачам. Найбільші регазифікаційні термінали Європи наведені у табл. 2.

Таблиця 2
Найбільші регазифікаційні термінали Європи

Країна	Термінал	Потужність на 01.01.2023, млрд. м ³
Бельгія	Zeebrugge	9,0
Великобританія	Teesside	4,0
Греція	Revithoussa	5,2
Іспанія	Barcelona	17,1
Італія	Porto Levante	8,0
Нідерланди	Gate Terminal	12,0
Польща	Swinoujscie LNG	5,0
Португалія	Sines	7,6
Туреччина	Marmara Ereğlisi	6,2
Франція	Montoir-De-Bretagne	10,0

У 2023 р. міжнародні постачання газу трубопроводами склали 682 млрд. м³, зрідженого газу суднами-газовозами – 412 млрд. м³. При цьому частка зрідженого газу в загальному обсязі поставок щорічно зростає та за прогнозами, що є, збільшиться до 650 ... 680 млрд. м³ до 2030 р.

Наведені дані підтверджують актуальність розвитку океанських перевезень ЗПГ, що здійснюються суднами-газовозами [3, 4].

Зріджений природний газ є найкращою формою для перевезення та зберігання газу на судах. Однак, все обладнання для зберігання, передачі та використання газу має бути сконструйоване так, щоб постійно підтримувалися необхідні криогенні умови. Крім того, всі технологічні операції з підготовки вантажних танків суден до транспортування ЗПГ, завантаження ЗПГ на судно-газовоз, транспортування ЗПГ з порту завантаження до порту вивантаження, вивантаження ЗПГ, зачищення вантажних танків після вивантаження ЗПГ повинні виконуватися відповідно до розроблених рекомендацій та забезпечувати конструкційну надійність, пожежо- та вибухобезпеку, екологічність та енергоефективність. Це є необхідною вимогою для

безпечного та надійного функціонування суден, що забезпечують перевезення зрідженого газу.

Обов'язковим етапом вантажних операцій в порту вивантаження ЗПГ є інертизація танків. Після закінчення вивантаження в вантажних трюмах суден-газовозів завжди залишається декілька частина вантажу. Це пов'язано з неминучим підвищенням температури ЗПГ під час його вивантаження. Одночасно з цим частина залишків ЗПГ, що перевозився як вантаж, випаровується та (за властивостями газу) займає весь вільний обсяг вантажного танка. Саме на попередження цього ефекту спрямована інертизація вантажних танків, під час якої в них з тиском, підвищеним в порівнянні з тиском залишків парів вантажу, подається інертний газ. Джерелом інертних газів можуть бути випускні газі суднових допоміжних котлів; газі, що генеруються в генераторі інертних газів під час спалювання в них рідкого палива; безпосередньо хімічно чисті азот [5, 6]. В перший двох випадках отримання інертного газу (функції якого утворює діоксид вуглецю CO_2) пов'язано зі спалюванням нафтового палива та додатковим негативним впливом на довкілля [7, 8]. В третьому – генератори азоту забезпечують виділення азоту N_2 з повітря, при цьому в атмосферу повертається чистий кисень O_2 . Генератори азоту можуть входити до складу суднового обладнання суден-газовозів. Постачання азоту в вантажні танки також може здійснюватися з берегових станцій приймання ЗПГ. Цей спосіб (через його більш високу продуктивність) також використовується за умовою скороченої стоянці судна-газовозу та під час необхідності скорішого залишення порту.

Необхідною умовою якісного проведення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів є забезпечення стійкого шару, що поділяє пари вантажу, які залишились в танку, та інертний газ, що в нього подається (рис. 1).

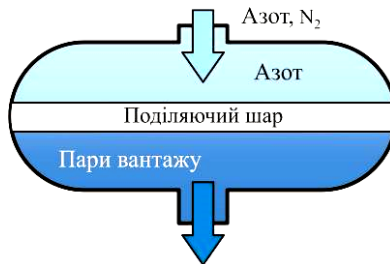


Рис. 1. Утворення поділяючого шару між парами вантажу та інертним газом під час проведення інертизації вантажних танків суден-газовозів

У випадку підтримання стійкого поділяючого шару у вантажному танку забезпечується ефект «поршню», через який здійснюється поступове, але постійне витиснення залишків вантажу. Розрив поверхні поділяючого шару сприяє потраплянню парів вантажу з нижньої частини танку в верхню. При цьому над поверхнею поділяючого шару здійснюється утворення суміші інертного газу та парів вантажу, концентрація яких в загальному об'ємі суміші постійно коливається [9, 10]. Це збільшує час інертизації вантажних танків, та призводить к підвищенню витрати інертного газу, а також (через збільшення витрати енергії на генерації інертного газу) знижує енергетичну ефективність процесу інертизації. Підставою порушення суцільності поділяючого шару у вантажному танку може стати підвищений тиск інертного газу, який подається в танк, або неякісний стан інертного газу. В разі використання азоту це може бути наявність в газі води, яка за низькою температурою перетворюється в лід та може розірвати поверхню поділяючого шару. За умовою використання діоксиду вуглецю суцільність поверхні поділяючого шару може бути зруйнована через механічні домішки та тверди незгорілі частинки, що входять до складу випускних газів [11, 12].

Прагнення прискорити вантажні операції та скоротити час стоянки судна змушує виконувати процес інертизації з максимально можливим для вантажної системи тиском інертного газу [13, 14]. При цьому саме максимально можливий тиск інертного газу, що подається в вантажні танки, є єдиним показником, що вказується нормативних документах, які регулюють виконання вантажних операцій. Одночасно з цим не існує документів, які визнають критичний тиск в системі інертизації, перебільшення якого призводить до порушення суцільності поділяючого шару. При цьому цей тиск може бути різний для різного вантажу, а також для різної кількості остаточного вантажу, що залишився в донній частині вантажного танку після проведення технологічної операції з його вивантаження [15, 16].

Контроль наявності поділяючого шару у вантажному танку неможливий оптичними або візуальними засобами контролю, що обумовлюється непрозорим середовищем всередині танку. Суцільність поділяючого шару, а також рівень, на кому він знаходиться в вантажному танку може бути визначені через вимір концентрації інертного газу в обсязі танку [17, 18]. Відповідно до вимог Кодексу ІМО для газозовів, вантажні танки цих суден обов'язково повинні мати індикатори рівню, які встановлюються на висотах, що відповідають 5 %, 50 % та 95 % від повного об'єму танку [19, 20]. Призначення цих індикаторів – контроль заповнення об'єму вантажних танків. Ці

індикатори знаходяться безпосередньо на бічній поверхні танку в вантажному відділенні судна. Крім того, додатково встановлюються індикатори рівня, що відповідають 20 %, 50 % та 80 % від повного об'єму танку. Візуалізація значень цих індикаторів виведена на пост управління, що знаходиться на вантажній палубі судна. Основне функціональне призначення цих індикаторів – контроль рівномірності завантаження в різних танках під час проведення вантажних операцій з метою забезпечення стійкості судна. Саме через комплексне використання цих двох груп індикаторів можливий контроль суцільності поділяючого шару, що знаходиться у вантажному танку. При цьому як показник, за яким здійснюється цей контроль, необхідно обирати саме концентрацію інертного газу.

Для підтвердження можливості подібного контролю на судні-газовозі з вантажомісткістю 15314 м³ виконувались наступні дослідження.

Після закінчення операцій з вивантаження вантажу забезпечувався процес інертизації його вантажних танків (рис. 2). З цією метою у вантажні танки 6 подавався азот N₂, який генерувався за технологію Pressure Swing Adsorption (PSA) в генераторі 2.

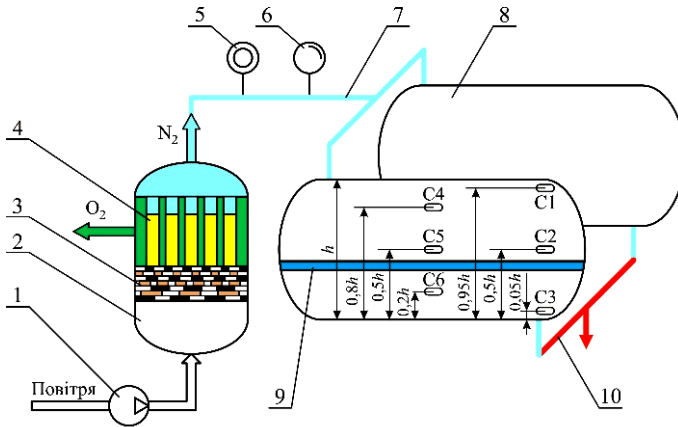


Рис. 2. Інертизація вантажних танків суден-газовозів азотом за допомогою технології PSA:

- 1 – компресор; 2 – генератор; 3 – комбінація фільтрів; 4 – адсорбційні судини; 5 – витратомір; 6 – манометр; 7 – магістраль подачі азоту; 8 – вантажний танк; 9 – поділяючий шар; 10 – магістраль видалення залишків вантажу

Отримання азоту за технологією PSA передбачає виділення азоту з повітря, яке нагнітається до генератору 2 компресором 1. Генератор азоту PSA виробляє азот за допомогою процесу, який починається, коли стиснене повітря проходить через комбінацію фільтрів 3 для видалення мастила та вологи, потім очищене повітря спрямовується в адсорбційні судини 4, що містять вуглецеві молекулярні сита. Вода, що залишилася, вуглекислий газ та інші домішки адсорбуються матеріалом сита. За умовою високих тисків в генераторі сита адсорбують кисень. Азот виробляється з бажаною чистотою, а кисень прямує назад в атмосферу. Генератори азоту PSA можуть виробляти азот із чистотою до 99,9995 %, що дуже актуально для підтримки пожежо- та вибухобезпеки в вантажних танках суден-газовозів, а також для попередження утворення льодових пробок та механічних забруднень в магістралях, якими азот прямує в вантажні танки.

Залишки вантажу, що витісняються азотом з танку 8, магістраллю 10 спрямовуються в інший танк, або в приймальну берегову магістраль. Поділяючий шар 9, що утворюється в вантажному танку, попереджує сумішоутворення парів залишків вантажу (які завжди присутні в танку після вантажних операцій) та інертного газу, що подається в танк.

Кількість та тиск азоту, що генерується в генераторі 2, контролюється за допомогою витратоміру 5 та манометру 6, що встановлені на магістралі 5. Кількість та стан вантажу, що знаходиться в вантажних танках 8, контролюються за допомогою індикаторів C1...C6, які дозволяють одночасне визначення рівню рідини в танку та концентрації парів речовини, що знаходиться всередині танку. Контроль рівню рідини є обов'язковим показників під час завантаження та вивантаження зрідженого газу. Визначення складу парів речовини, що знаходиться в танку, дозволяє діагностувати як процеси завантаження / вивантаження, також і процеси дегазації / інертизації. При цьому в залежності від типу вантажу та способу інертизації можливо одночасно визначення до десяти складових (азот, аміак, бутан, водень, діоксид вуглецю, ізобутан, кисень, метан, пропан, пропілен). Основні індикатори C1, C2, C3 забезпечували контроль показників на рівнях, що відповідають 5 %, 50 % та 95 % від загальної глибини танку. Додаткові індикатори C4, C5, C6 забезпечували контроль показників на рівнях, що відповідають 20 %, 50 % та 80 % від загальної глибини танку.

Одним з завдань дослідження було визначення впливу тиску азоту (який використовувався як інертний газ) на стійкість поділяючого

шару, що попереджує сумішоутворення парів вантажу, які залишились в танку, та азоту, який забезпечує процес інертизації.

Під час дослідження виконувалось вимірювання концентрації азоту в наступних контрольних точках вантажного танку:

на висоті $0,05h$, що відповідає 5 % від загальної висоти танку h (за допомогою індикатору C3);

на висоті $0,2h$, що відповідає 20 % від загальної висоти танку h (за допомогою індикатору C6);

на висоті $0,5h$, що відповідає 50 % від загальної висоти танку h (за допомогою індикаторів C2 та C5);

на висоті $0,8h$, що відповідає 80 % від загальної висоти танку h (за допомогою індикатору C4);

на висоті $0,95h$, що відповідає 95 % від загальної висоти танку h (за допомогою індикатору C1) – рис. 2.

Відповідно до характеристик генератору азоту, тиск азоту, що виробляється в генераторі, складає $0,7 \dots 1,05$ МПа з рекомендованим фрахтувальником експлуатаційним діапазоном $0,8 \dots 1,0$ МПа. В зв'язку з цим дослідження з визначення впливу тиску азоту, що потрапляє в вантажні танки для їх інертизації, на стійкість та суцільність поділяючого шару виконувались зі значення $p_1=0,85$ МПа (яке приймалось як «базове») та подальшого покрокового збільшення тиску: $p_2=0,90$ МПа, $p_3=0,95$ МПа. Тривалість експерименту складала 14 г, фіксація значень концентрації азоту виконувалась через кожні 2 г. Контроль тиску азоту, що подавався в вантажні танки, концентрація азоту за висотою вантажного танку, а також час проведення вимірювань забезпечувався за допомогою мікроконтролерних систем управління [21].

Результати досліджень наведені в табл. 3 - 5. Порівняння результатів, що наведені в табл. 3, 4 та рис. 3, 4, свідчать, що збільшення тиску нагнітання з $0,85$ МПа до $0,90$ МПа прискорює процес інертизації, при цьому час інертизації скорочується зі 14 г до 12 г. Таке підвищення тиску не впливає на стійкість та суцільність поділяючого шару, за що свідчить 100 %-а концентрація азоту за всієї висотою вантажного танку.

Порівняння результатів, що наведені в табл. 3, 5 та рис. 3, 5 свідчать, що збільшення тиску нагнітання з $0,85$ МПа до $0,95$ МПа призводить до поступового руйнування стійкості та суцільності поділяючого шару. Це підтверджується зменшенням концентрації азоту в верхній частини вантажного танку за певний проміжок часу ($8 \dots 10$ г). При цьому відбувається поступове сумішоутворення парів

залишків вантажу та азоту. Процес інертизації вантажних танків погіршується, що змушує виконувати його повторно, одночасно з цим підвищується витрата азоту, збільшуються витрати енергії на його виробництво або отримання, а також підвищуються стоянковий час експлуатації судна. Також необхідно враховувати, що залишки вантажу, що витісняються з вантажних танків азотом, у подальшому спалюються на території берегових вантажних комплексів. Це негативно впливає на екологію портової території та прибережної акваторії.

Таблиця 3
Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_1=0,85$ МПа

Час, г	Концентрація азоту за різною висотою вантажного танку				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	34	0	0	0
4	100	68	28	12	0
6	100	84	72	46	23
8	100	100	88	76	58
10	100	100	100	91	81
12	100	100	100	100	100

*Виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 4
Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_2=0,90$ МПа

Час, г	Концентрація азоту за різною висотою вантажного танку				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	62	34	0	0
4	100	82	68	29	0
6	100	100	92	62	42
8	100	100	100	84	72
10	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100

*Виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 5

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_3=0,95$ МПа

Час, г	Концентрація азоту за різною висотою вантажного танку				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	68	42	24	14
4	100	88	78	56	38
6	100	100	100	62	48
8	100	92	72	52	32
10	88	77	68	42	22
12	75	62	44	32	18

*Виділено час, в який відбувається руйнування поділяючого шару.

Для кращої візуалізації, результати, що наведені в табл. 3 - 5, подані як діаграми (рис. 3 - 5).

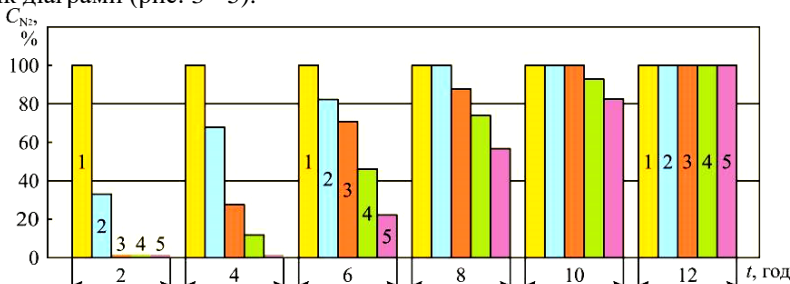


Рис. 3. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання $p_1=0,85$ МПа за різною висотою вантажного танку: 1 - 0,95h; 2 - 0,8h; 3 - 0,5h; 4 - 0,2h; 5 - 0,05h

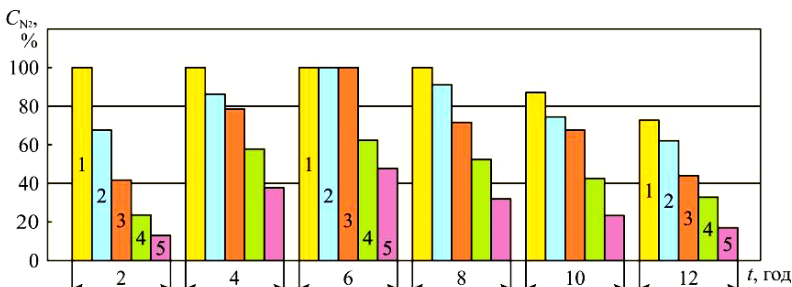


Рис. 4. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання $p_2=0,90$ МПа за різною висотою вантажного танку: 1 - 0,95h; 2 - 0,8h; 3 - 0,5h; 4 - 0,2h; 5 - 0,05h

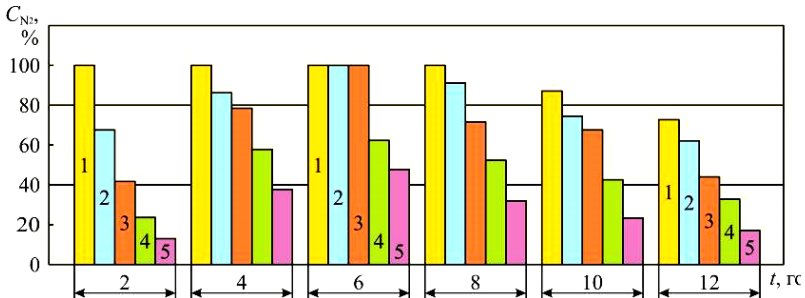


Рис. 5. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання $p_3=0,95$ МПа за різною висотою вантажного танку: 1 – 0,95h; 2 – 0,8h; 3 – 0,5h; 4 – 0,2h; 5 – 0,05h

Під час проведення експериментів виконувались всі вимоги щодо безпечної експлуатації суднового допоміжного обладнання, а також вимоги Міжнародного кодексу з побудови та обладнання суден, що перевозять зріджені гази наливом та вимоги MARPOL щодо попередження забруднення довкілля [22 - 24].

Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Інертизація вантажних танків після вивантаження перевезеного вантажу є обов'язковим технологічним процесом забезпечення якого можливо шляхом заповнення танків азотом, який або генерується на судні, або подається з берегу.

2. Якісне проведення процесу інертизації можливо лише за умовою забезпечення стійкості та суцільності поділяючого шару, за допомогою якого попереджається сумішоутворення між парами вантажу, що залишився в танку після вивантаження, та інертним газом, що подається у вантажний танк.

3. Рекомендований фрахтувальником діапазон тиску інертного газу, що подається в вантажний танк для забезпечення процесу інертизації, не визначає найбільш раціональних значень – таких, за якими процес інертизації можливо виконати за найменший час з одночасним постійним підтриманням стійкості та суцільності поділяючого шару. Зменшення тиску нагнітання інертного газу сповільнює процес інертизації та збільшує його тривалість. Збільшення тиску нагнітання інертного газу прискорює інертизацію та скорочує час її проведення, але при цьому виникає небезпека руйнування поділяючого шару. Це призводить до виникнення сумішоутворення між інертним газом та парами залишків вантажу та змушує виконувати повторну інертизацію вантажних танків.

4. Забезпечення найкоротшого часу інертизації з одночасним підтриманням стійкості та суцільності поділяючого шару можливо шляхом використання мікроконтролерів, за допомогою яких досягається управління тиском нагнітання інертного газу в залежності від зміну його концентрації за висотою вантажного танку.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Сагін, С. В., Матейко, О. В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ "ОМА". – С. 148 - 156.
2. Sagin S.V., Kuropyatnyk O. A., Zablotskyi Yu. V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 - 61.
3. Сагін, С. В., Матейко, О. В. Особливості інертизації вантажних танків під час перевезення вогнебезпечних речовин // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36 - 49.
4. Zablotskyi Yu.V., Sagin A. S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021 – Вип. 43. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 5 - 17.
5. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373.
6. Gorb S. I., Budurov M. I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // *International Review of Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 15(3). – P. 115 - 121.
7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331.
8. Sagin S. V., Kuropyatnik A. A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // *American Scientific Journal*. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 - 71.

9. Поповский, А. Ю., Сагин, С. В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – НУ "ОМА". – С. 74 - 83.

10. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7 - 8. – P. 29 - 35.

11. Сагин, С. В., Куропятник, А. А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 79 - 89.

12. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2021. – № 7 - 8. – P. 36 - 43.

13. Горб, С. І., Поповський, О. Ю., Будуров, М. І. Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 3 - 16.

14. Горб, С. І. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 17 - 34.

15. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 106 - 120.

16. Горб, С. І. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 26. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 3 - 26.

17. Сагін, С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 132 - 142.

18. Сагін, С. В., Мадей, В. В., Сагін, А. С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 93 - 107.

19. Побережний, Р. В., Сагін, С. В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – Вип. 41. – Одеса: НУ "ОМА". – 2020. – С. 5 - 9.

20. Сагин, С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 - 100.

21. Горб, С. И., Никольский, В. В., Хнюнин, С. Г., Шапо, В. Ф. Методическое обеспечение технологий автоматизации на базе программируемых контроллеров // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2017. – Вып. 23. – Одесса: ОНМА. – С. 30 - 35.

22. Горб, С. И., Горб, А. С. Программное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: ОНМА. – С. 34 - 48.

23. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskiy Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 - 61.

24. Куропятник, А. А., Сагин, С. В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 72 - 80.

Abstract. *The considered question regarding ensuring the process of inertization of cargo tanks of gas carriers. It was determined that all technological operations for the preparation of cargo tanks of vessels for the transportation of liquefied natural gas, loading, transportation, unloading, cleaning of cargo tanks after unloading of liquefied natural gas must be performed in accordance with the developed recommendations and ensure structural reliability, fire and explosion safety, environmental friendliness and energy efficiency. As a mandatory stage of cargo operations in the port of liquefied natural gas unloading, tank inertization is considered - a technological operation, the necessity of which is connected with the fact that after the end of unloading, some part of the cargo always remains in the cargo holds of gas carriers. It is noted that the source of inert gases can be the exhaust gases of the ship's auxiliary boilers; gases generated in the inert gas generator during the burning of liquid fuel in them; and directly chemically pure nitrogen. A schematic diagram of the ship's inert gas generation system is provided, which, through filtration and adsorption, releases nitrogen from the air, which is then supplied to the cargo tanks of the gas carrier. The results of research on ensuring the process of*

inertization of cargo tanks of gas carriers are provided. It was determined that inertization is impossible without the formation of a dividing layer in the cargo tank. This layer prevents the formation of a mixture between cargo vapors remaining in the cargo tank and inert gas, and performs the functions of a "piston" with the help of which the remaining cargo vapors are pushed out of the cargo tank. For a gas carrier with a cargo capacity of 15,314 m³, the values of nitrogen injection pressure (as an inert gas) were experimentally established, according to which the inertization process is carried out in the shortest time while ensuring the integrity and stability of the dividing layer. In order to ensure the shortest inertization time and simultaneously maintain the stability and integrity of the dividing layer, it is proposed to use microcontrollers that control the injection pressure of inert gas depending on the change in its concentration along the height of the cargo tank.

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 Кирилович¹, Веретеннік Олександр Михайлович²
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
sa@onma.edu.ua¹, vamod@ukr.net²

Технічне діагностування суднових холодильних установок на основі волоконно- оптичних технологій

Sandler Albert¹, Veretennik Oleksandr²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
sa@onma.edu.ua¹, vamod@ukr.net²

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.

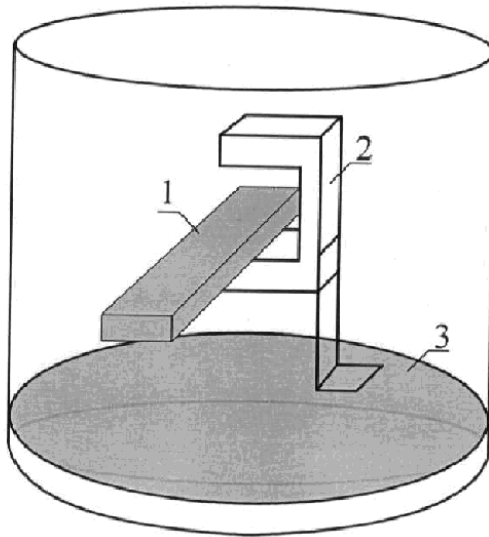


Рис. 2. Датчик вологості хладону з відкритою оптопарою:

- 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).

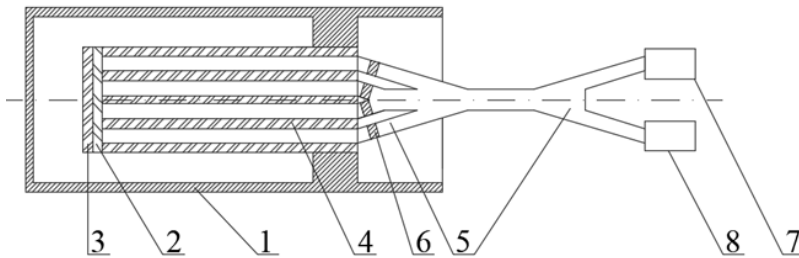


Рис. 3. Датчик контролю вологості хладону: 1 – корпус; 2 – пластина з хлориду кобальту; 3 – віддзеркалюючий шар; 4 – волоконно-оптичні світловоди; 5 – розгалужувач; 6 – оптичний фільтр; 7 – джерело оптичного випромінювання; 8 – приймач оптичного випромінювання

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 $\sin x/x$. Іntenсивність $A^2(u)$ 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 ρ_s – розмір плями пучка.

Таким чином, E_x не залежить від циліндричної координати φ , 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; ρ – 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 ρ_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_1, J_1 – 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:

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

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

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.

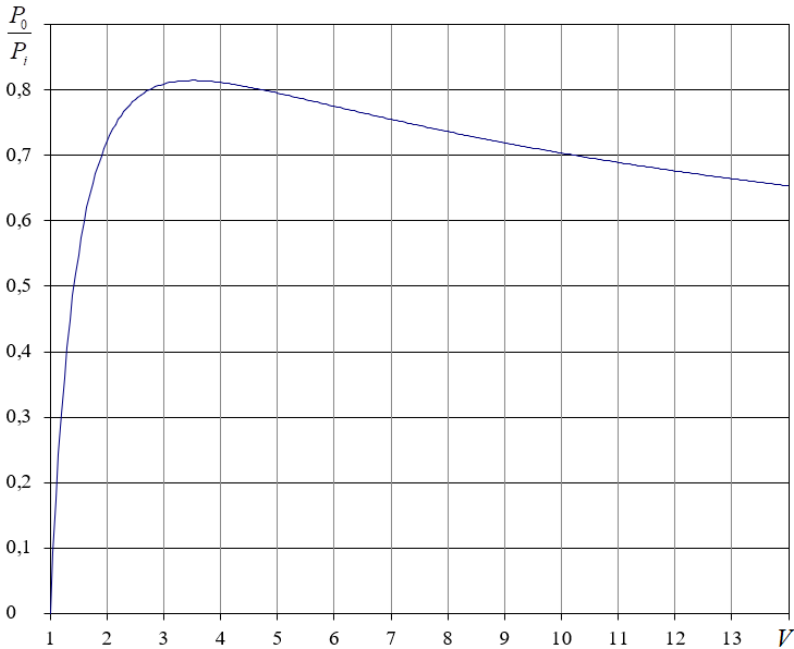


Рис. 4. Залежність частки оптичного випромінювання, що втрачається, від хвильового параметру

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.
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.
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.

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.*

УДК 621.373.826

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-104-113

ARTICLE HISTORY

Received 30.01.2024

Accepted 07.02.2024

Сандлер Альберт Кирилович¹, Палагін Олександр Миколайович²
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
sa@onma.edu.ua¹, apalagin113@gmail.com²

Вдосконалення адаптивного дзеркала суднових оптико-локаційних станцій

Sandler Albert¹, Palagin Oleksandr²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
sa@onma.edu.ua¹, apalagin113@gmail.com²

Improvement of the adaptive mirror of ships optical location stations

Резюме. Обґрунтовано схемотехнічне рішення адаптивного дзеркала суднової оптико-локаційної станції. У запропонованому дзеркалі відсутня необхідність корекційних дій з підтримки оптичних властивостей всіх елементів лінзи під впливом експлуатаційних чинників, розширений діапазон режимів роботи й одночасно можлива незалежна зміна оптичних властивостей різних поверхонь. Обґрунтовано застосування ніобату літію для виготовлення елементів дзеркала.

Summary. The schematic solution of the adaptive mirror of ship optical location stations is substantiated. In the proposed mirror, there is no need for corrective actions to maintain the optical properties of all lens elements under the influence of operating factors, the range of operating modes is expanded, and at the same time, independent changes in the optical properties of various surfaces are possible. The use of lithium niobate for the manufacture of mirror elements is substantiated.

Лазери суднових оптико-локаційних станцій мають ряд специфічних відмінностей, обумовлених співвідношенням геометрії резонатора та довжиною хвилі випромінювання. Звичайно поперечний переріз резонатора цих лазерів відрізняється від довжини хвилі

приблизно на два порядки. У таких лазерах застосовуються резонаторні елементи хвилеводного типу. Для виводу випромінювання використовуються частково прозорі вихідні дзеркала. Фізично дзеркала реалізуються у вигляді періодичних структур, період яких менший довжини хвилі. Структури, у більшості випадків, утворюються металевими провідниками різних конфігурацій. Важливими властивостями періодичних структур є достатньо великий діапазон варіювання коефіцієнта пропускання й можливість змінювати поляризаційні та енергетичні параметри оптичного випромінювання. Зазначені якості дозволили зайняти періодичним структурам домінуюче положення в галузі вихідних дзеркал лазерів.

Періодичні структури, утворені паралельними провідниками, дозволяють одержувати лінійно поляризоване випромінювання з напрямком вектору поляризації електричного поля, паралельним провідникам ґрат. Крім того, періодичні структури вносять фазове зрушення у електромагнітне випромінювання, яке відбивається від них або проходить наскрізь.

Величина фазового зрушення залежить від параметрів періодичної структури – геометричних розмірів провідників і відстаней між ними. Якщо параметри періодичної структури неідентичні уздовж її поверхні, то це приводить до зміни фазового фронту випромінювання. Тому періодична структура, яка створена на плоскій поверхні, може набувати властивості скривлених дзеркал і лінз. Такі властивості можуть бути корисні при використанні градієнтних ґрат як вихідних дзеркал лазерів. Адже в лазерах часто застосовуються сферичні дзеркала для досягнення необхідної каустики резонатора й зниження дифракційних втрат випромінювання. У резонаторах лазерів діапазону для зниження дифракційних втрат використовуються сферичні дзеркала з більшим радіусом кривизни. Такі дзеркала дозволяють зменшити втрати не тільки в класичних відкритих резонаторах, але й у резонаторах хвилеводного типу, оскільки зменшують негативний вплив неоднорідностей хвилеводу й зазорів між хвилеводом і дзеркалами. Однак сферичні дзеркала великого радіуса кривизни значно складніше у виготовленні, ніж плоскі дзеркала. Тому створення плоских частково прозорих дзеркал, здатних викривляти фазовий фронт електромагнітних хвиль, що властиве сферичним дзеркалам і лінзам, є досить актуальним завданням [1, 2].

Відома велика кількість конструктивного виконання періодичних ґрат. Найбільш технологічними є металеві ґрати, виконані на прозорій діелектричній підложці. На підложці можна виконувати структури різноманітних конфігурацій, наприклад, у вигляді суцільних або

фрагментованих провідників. Особливий інтерес представляють періодичні структури у вигляді концентричних кілець і радіальних смуг, які дозволяють одержувати лазерне випромінювання з радіальною та азимутальною поляризацією.

Відоме дзеркало, що виконане з металу та має на своїй поверхні періодичні структури у вигляді ґрат з паралельних провідників (рис. 1) [3].

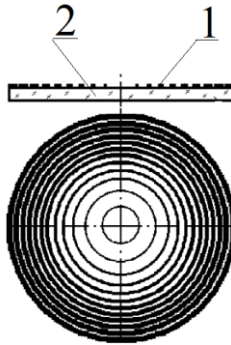


Рис. 1. Дзеркало лазера: 1 – металеві кільця; 2 – прозора пластина

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням металу, як основи дзеркала:

- необхідність постійного корегування зміни оптичних властивостей металеві поверхні при контакті з навколишнім середовищем (очищення та шліфування);

- необхідність додаткової термокомпенсації деформації основи дзеркала;

- необхідність компенсації впливу еліптичності випромінювання, яка обумовлена анізотропією дзеркала.

Найбільш близьким за технічною сутністю та результатом, що досягається до рішення задачі вдосконалення дзеркала лазера, є азимутальне вихідне дзеркало, що містить металеві кільця, концентрично розташовані на скляній прозорій плоскій основі-пластині, яке відрізняється тим, що ширина кілець та відстані між ними послідовно змінюються у напрямку від краю до центра пластини, причому послідовність зміни може бути плавною або плавно дискретною [4, 5].

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням сполучення металу та скла у основі дзеркала:

застосування матеріалів з показниками теплового поширення, що суттєво відрізняються;

необхідність постійного корегування зміни оптичних властивостей металеві поверхні при контакті з навколишнім середовищем (очищення та шліфування);

складність підтримки юстирування дзеркала в наслідок теплового впливу;

обмеженість діапазону режимів роботи.

Таким чином, доцільним є здійснення дослідження зі створення адаптивного дзеркала, у якому відсутня необхідність корекційних дій з підтримки оптичних властивостей всіх елементів лінзи під впливом експлуатаційних чинників, розширений діапазон режимів роботи й одночасна можливістю незалежної зміни оптичних властивостей різних поверхонь.

Поставлена задача вирішується тим, що адаптивне дзеркало корабельних оптико-локаційних станцій, що складається з основи, яка містить концентричні прозорі кільця, ширина яких та відстані між ними послідовно змінюються у напрямку від краю до центра дзеркала. Послідовність зміни може бути плавною або плавно дискретною. Відмінність пропонованого дзеркала полягає у тому, що кільця, які виконані з електрооптичного матеріалу та розділені шарами скла зі штучного сапфіру, згруповані в єдиний блок у межах основи та підключені до плати керування.

Конструкція дзеркала складається з основи 1, яка виконана з сапфірового скла. У внутрішньому просторі опори містяться концентричні прозорі кільця з електрооптичного матеріалу 3, які розділяються концентричними кільцями з штучного сапфірового скла 4, товщина яких перебуває у нанодіапазоні. Кільця з електрооптичного матеріалу та штучного сапфірового скла виконуються методом плазмового осадження. Кільця з арсеніду галію сполучені з відповідними контактами плати керування 2, яка, також міститься у просторі основи (рис. 2).

При включенні дзеркала до роботи з плати керування надходить напруга до відповідних кілець з арсеніду галію. Це дозволяє задати відповідні оптичні характеристики кожного кільця [5 - 7]. Таким чином відбувається формування необхідної азимутальної та радіальної поляризації лазерного випромінювання. Також з'являється можливість надати кільцевій періодичній структурі властивостей вигнутого дзеркала та фокусуєної лінзи. Основа та концентричні шари зі штучного сапфірового скла застосовані для запобігання додаткових

термічних деформацій у обсязі дзеркала та перекручувань оптичного шляху світла [8 – 10].

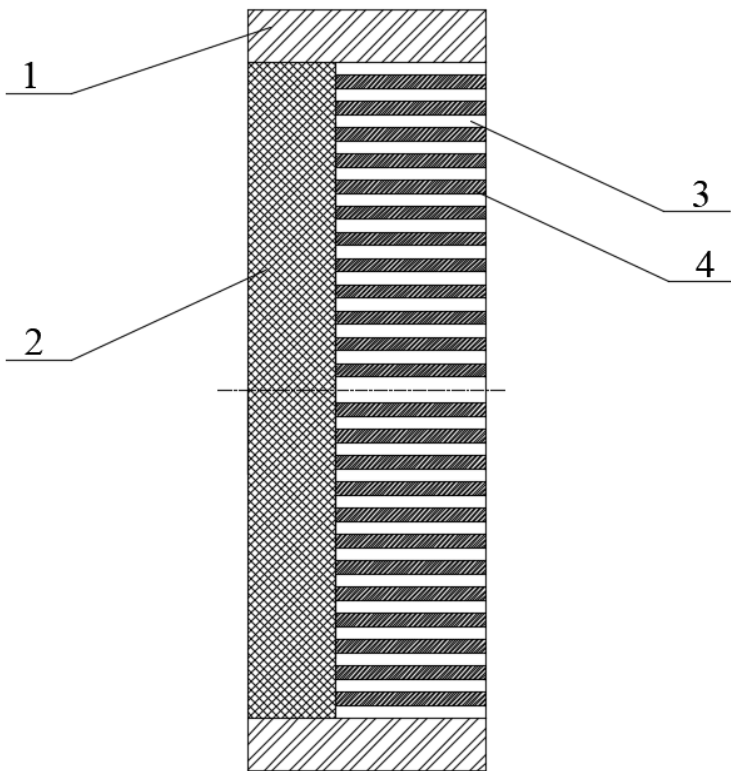


Рис. 2. Адаптивне дзеркало лазерів корабельних оптико-локаційних станцій: 1 – основа; 2 – плата керування; 3 – концентричні прозорі кільця з електрооптичного матеріалу; 4 – концентричні шари з сапфірового скла

У динамічному режимі (включенні дзеркала до роботи) відбувається вихід лазера на стабільний робочий режим і налаштування дзеркала на центральну частоту. Налаштування полягає у з тому, що з плати керування надходить напруга до відповідних кілець з електрооптичного матеріалу. Це дозволяє задати відповідні оптичні характеристики кожного кільця. Таким чином відбувається формування

необхідної азимутальної та радіальної поляризації лазерного випромінювання.

Використання електрооптичного керування дзеркала представляє більші можливості при здійсненні різних режимів роботи лазера. Електрооптичне керування резонатором лазера засноване на електрооптичному ефекті Поккельса, що полягає в зміні показника заломлення світла в матеріалах, поміщених в електричне поле [11].

Мода резонатора з подібними дзеркалами являє стоячу хвилю, яка еквівалентна двом хвилям, що біжать, рівної інтенсивності, що поширюються в протилежних напрямках. Якщо потік енергії в кожній із хвиль, що біжать, дорівнює P , то при відбитті від двох однакових дзеркал відбувається втрата потужності на рівні $2P(1 - R)$. Отже, енергія втрачена за період коливання буде становити $2P(1 - R)\lambda/c$. Енергія ж, накопичена в резонаторі, складе $2PL/c$. Звідки добротність резонатора [12]:

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{1}{1 - R},$$

де R – коефіцієнт відбиття; λ – довжина хвилі випромінювання; L – геометричний розмір дзеркала.

При впливі зовнішнього електричного поля матеріал стає оптично анізотропним, що проявляється в зміні показника заломлення Δn для хвилі випромінювання, поляризованої паралельно зовнішньому електричному полю, на рівні

$$\Delta n = \frac{r_{ij} n_0^3 E_{BH}}{2},$$

где r_{ij} – тензор лінійного електрооптичного ефекту; n_0 – показник заломлення матеріалу без електричного поля; E_{BH} – напруженість зовнішнього електричного поля.

З відомих матеріалів найбільшою мірою відповідають завданню електрооптичного керування дзеркалом арсенід галію та ніобат літію. Електрооптичний коефіцієнт арсенід галію, який відмінний від нуля, $r_{41} = 1,41$. Електрооптичні коефіцієнти ніобату літію, які відмінні від нуля: $r_{33} = 30,8$, $r_{13} = 8,6$, $r_{22} = 3,4$, $r_{42} = 28,0$ [13, 14].

Порівняння цих матеріалів з точки зору керування добротністю завдяки впливу електричного поля за різними напрямками на показник заломлення, дало такі результати (рис. 3).

Аналіз залежностей (рис. 3) дозволяє вважати доцільним використання у дзеркалі запропонованого схемотехнічного рішення ніобату літію, як матеріалу, що забезпечує більший діапазон керування оптичними властивостями дзеркала.

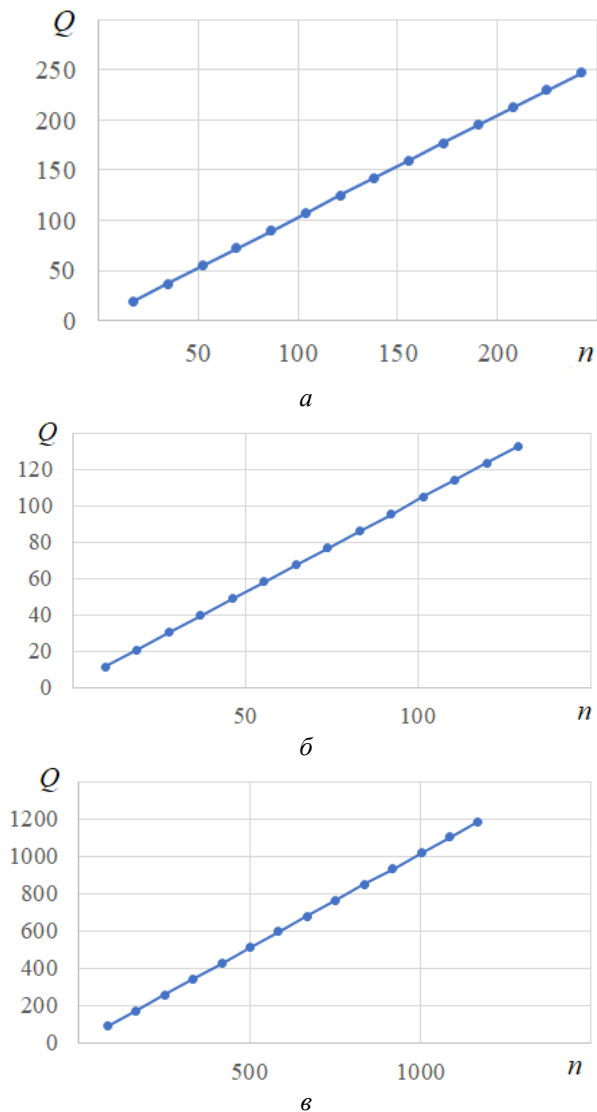


Рис. 3. Залежність величини добротності від показника заломлення
для: a – арсеніду галію ($r_{41} = 1,41$); b – ніобату літію ($r_{22} = 3,4$);
 v – ніобату літію ($r_{33} = 30,8$)

Крім того застосування ніобату літію для виготовлення концентричних електрокерованих кілець дзеркала, забезпечить: відсутність необхідності постійного корегування оптичних властивостей дзеркала;

спрощення юстирування дзеркала;

розширений діапазон робочих режимів.

Адаптивне дзеркало запропонованої конструкції має певні обмеження щодо свого застосування. Головне з таких обмежень відноситься до механічної стійкості та впливу підвищеної температури.

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

подальшому вдосконаленні моделі адаптивного дзеркала, яка дозволить забезпечити інваріантність до більшості експлуатаційних факторів протягом тривалих термінів часу;

пошуках альтернативних матеріалів з більш досконаліми фізико-механічними властивостями для керованих елементів дзеркала;

оптимізації конструкції за критеріями довготривалої надійності та швидкодії.

У відповідності до сформульованої задачі запропоновано нове схемотехнічне рішення адаптивного дзеркала суднових оптико-локаційних станцій. На відміну від існуючих, запропоноване схемотехнічне рішення спроможне значним чином збільшити робочий діапазон керування. Впровадження нового адаптивного дзеркала дозволить підвищити якість й надійність функціонування встаткування.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Дзюбенко, М. И., Маслов, В. А., Одаренко, Е. Н., Радионов, В. П. Перспективы использования градиентных решеток в лазерах терагерцевого диапазона // Радиофизика і радіоастрономія. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 302 - 312.

2. Молебный, В. В. Оптико-локационные системы: Основы функционирования и построения. – М.: Машиностроение, 1981. – 183 с.

3. Шестопапов, В. П., Кириленко, А. А., Масалов, С. А., Сиренко, Ю. К. Резонансное рассеяние волн. – Т. 1. – Дифракционные решетки. – К.: Наукова думка, 1986. – 227 с.

4. Патент України № 115126. МПК H01S 3/08 (2006.01), H01S 3/034 (2006.01), B23K 26/064 (2014.01). Азимутальне вихідне дзеркало

лазерного резонатора / М. І. Дзюбенко, В. О. Маслов, В. П. Радіонов; заявник та володар патенту Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усікова Національної академії наук України. – № u201607610. – заявл. 11.07.2016. – опубл. 10.04.2017, бюл. № 7. – 3 с.

5. Dzyubenko, M. I., Kiseliiov, V. K., Radionov, V. P., 2015. Resonator Methods of Measuring Refractive Index of a Transparent Substance in the Terahertz Band // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2015. – № 74(8). – P. 725 – 733.

6. Гуляев, Ю. В., Меш, М. Я., Проклов, В. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 150 с.

7. Платонов, Р. А. Электрически перенастраиваемые устройства на основе нелинейных диэлектриков для управления диаграммой направленности в антенных системах миллиметрового диапазона длин волн: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01/ ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ". – С-Пб., 2018. – 20 с.

8. 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.

9. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277 - 279.

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.

11. Быков, М. М., Скринник, Н. Г. Лазеры с модулированной добротностью резонатора с помощью фототропных сред // *Радиотехника*. – 2000. – Вып. 116. – С. 121 - 123.

12. Черняков, Е. І., Мачехін, Ю. П., Кухтін, М. П., Кухтін, С. М. Оптоелектроніка. – Х.: ХНУРЕ, 2016. – 292 с.

13. Нарасимхамурти, Т. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

14. Кузьминов, Ю. С. Ниобат и танталат лития. – М.: Наука, 1975. – 224 с.

Abstract. *One of the directions that determine the improvement of the quality and probability of functioning of the ship's optical location station is the use of the latest materials based on nanotechnology. The lasers of the ship's optical location stations have a number of specific differences due to the ratio of the geometry of the resonator and the wavelength of the radiation. Physically, mirrors are realized in the form of periodic structures, the period of which is less than the wavelength. Spherical mirrors with a larger radius of curvature are used in resonators of range lasers to reduce diffraction losses. Such mirrors make it possible to reduce losses not only in classic open resonators, but also in waveguide-type resonators, as they reduce the negative impact of waveguide inhomogeneities and gaps between the waveguide and mirrors. However, spherical mirrors with a large radius of curvature are much more difficult to manufacture than flat mirrors. Therefore, the creation of flat partially transparent mirrors capable of bending the phase front of electromagnetic waves, which is characteristic of spherical mirrors and lenses, is a rather urgent task. The goal of the work is to implement the latest constructive implementation of the adaptive mirror of optical location stations. The object of research is the processes of formation and transformation of an optical signal in an adaptive mirror. The subject of additional research is electro-optical mirrors. It is proposed to solve the given problem due to the introduction of a new mirror consisting of a base made of sapphire glass. The inner space of the support contains concentric transparent rings made of electro-optical material, which are separated by concentric rings made of artificial sapphire glass, the thickness of which is in the nano range. Rings made of electro-optical material and artificial sapphire glass are made by the method of plasma deposition. Gallium arsenide rings are connected to the corresponding contacts of the control board, which is also contained in the space of the base. The introduction of a new adaptive mirror will improve the quality and reliability of the equipment's functioning.*

UDC 681.53/54

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-114-127

ARTICLE HISTORY

Received 05.09.2024

Accepted 18.09.2024

Levinskyi Maksym Valeryevich¹, Levinskyi Valeryi Myhailovich²
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine¹
Odessa National Technological University, Odessa, Ukraine²
MaxLevinskyi@gmail.com¹, ValeryLevinskyi@gmail.com²

Automated parameter selection for throttling control valves

Левінський Максим Валерійович¹, Левінський Валерій Михайлович²
НУ "Одеська морська академія"¹
Одеський національний технологічний університет²
MaxLevinskyi@gmail.com¹, ValeryLevinskyi@gmail.com²

Автоматизований вибір параметрів дросельних регулюючих органів

Summary. *When designing new systems for automatic control of technological processes, there is a need to choose the type and calculate the parameters of throttle regulating bodies (RO). Therefore, the throughput (ideal) characteristic of RO in working conditions is called the consumption (real) characteristic. Selection of throttle RO parameters requires a certain theoretical training and practical skills from the designer, which should be acquired using specialized programs from manufacturers. These programs allow designers of automatic control systems to develop skills in the selection of valves and actuators, to correctly place orders for the manufacturing company.*

Резюме. *При проектуванні нових систем автоматичного керування технологічними процесами виникає необхідність вибору типу і розрахунку параметрів дросельних регулюючих органів (РО). Вибір параметрів дросельних РО потребує від проектувальника певної теоретичної підготовки і практичних навичок, які доцільно набутти, використовуючи спеціалізовані програми від фірм-виробників. Дані програми дозволяють сформувати у проектувальників систем*

автоматичного керування навички з вибору клапанів та виконавчих механізмів, коректно скласти замовлення для фірми-виробника.

Throttling regulating valves (RV), for example, valves or dampers, are designed to change the flow rate of the substance entering the technological unit in proportion to the amount of the control action of the regulator. Throttle RVs are part of the pipeline network, which also includes pumps, pipes, elbows, shut-off valves and other local resistances. They have their own typical dependence of pressure loss depending on flow rate [1].

The pump head depends on the flow rate, which decreases when the flow rate increases. Pump manufacturers usually indicate this relationship in their manuals. In liquid transport systems, the pump size is selected to operate at maximum efficiency at rated flow rates. Under conditions of minimum flow, the pump pressure is higher, and under conditions of maximum flow, the pressure is lower than optimal. This change is manifested in a change in the pressure drop $\Delta P = P_1 - P_2$ at the RV when the flow rate Q in the network changes (Fig. 1). At rated flow rates, the control valve typically accounts for approximately one-third of the total system pressure loss [1].

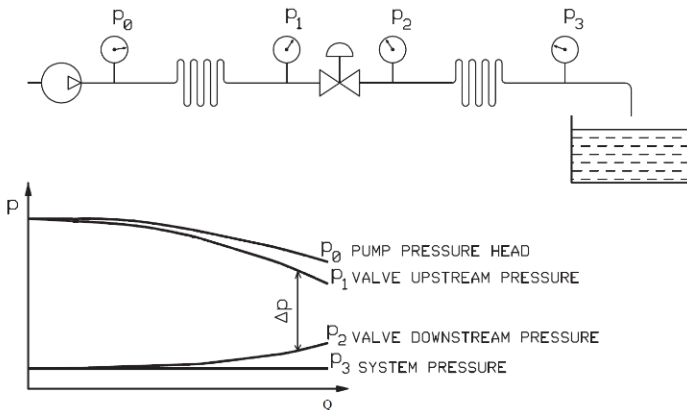


Fig. 1. Pressure loss in the pipeline network [1]

From a hydraulic point of view, the throttle RV is a complex variable local resistance. When passing through it, the flow of matter undergoes compression, expansion, rotation, separation and subsequent merging (Fig. 2, a).

During operation, not only the live cross-section of the passage and its geometry changes, but also the flow speed; in addition, the density of the substance, its viscosity and temperature may change. All noted factors

complicate the analytical calculation of the parameters of throttle control valves.

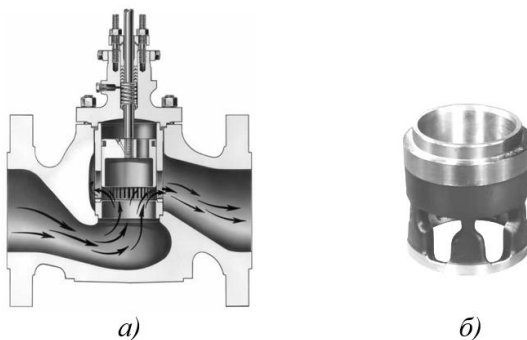


Fig. 2. Example of RVs designs from Fisher [2]:

a) – cell valve with noise reduction; *b)* – a cage which provides a linear throughput characteristic of the valve

In throttling valves, a change in their hydraulic resistance ΔP and flow capacity k_V occurs due to a change in the flow area depending on the linear h or angular α stroke of the movable part of the valve, consisting of a seat and a plunger [3].

In the technical documentation, manufacturers indicate the flow capacity k_V , m^3/h of the regulatory valve as the water flow through it with a density of $\rho=1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ under the influence of a pressure difference $\Delta P=0.1 \text{ MPa}$ (1bar). At the maximum stroke (conditional stroke) of the rod h_S (or a_S), the k_V value is maximum and is called the conditional capacity k_{VS} [3].

The documentation also indicates the throughput characteristics of the valve. In dimensionless form, this is the dependence of the relative flow capacity k_V/k_{VS} on the degree of opening h/h_S (or α/a_S) [3]. It can be, for example, linear or equal percentage (Fig. 3), which mainly depends on the design of the seat and plunger (Fig. 2, *b*).

To understand the physical meaning of the k_V parameter, one should recall the Weisbach formula for local resistance. Let us first write it for idealized conditions, when water with density $\rho_v=1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, speed V_V , m/h and flow Q_V , m^3/hour flows through a valve with local resistance ξ and inlet area S , m^2 under the influence of a pressure difference $\Delta P_{V=1 \text{ bar}}$:

$$\Delta P_v = \xi \frac{\rho_v V_v^2}{2} = \xi \frac{\rho_v Q_v^2}{2S^2}.$$

Similarly, for another liquid that flows through the same valve, you can write:

$$\Delta P_1 = \xi \frac{\rho_1 V_1^2}{2} = \xi \frac{\rho_1 Q_1^2}{2S^2}.$$

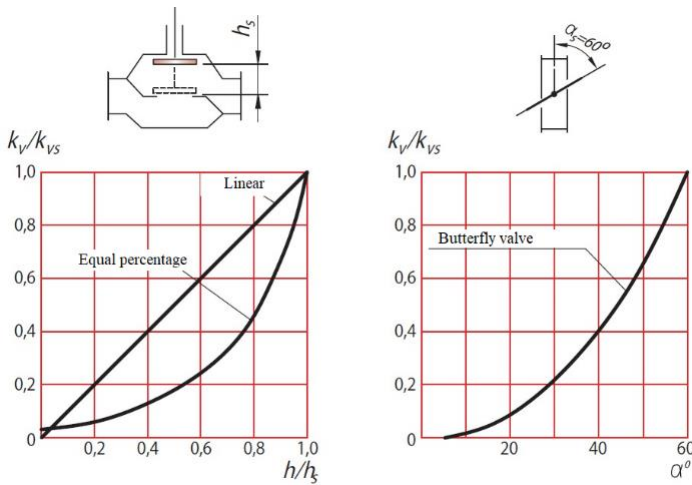


Fig. 3. Throughput characteristics of regulatory valves [3]

Then

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_v} = \frac{\rho_1 Q_1^2}{\rho_v Q_v^2},$$

from where, taking into account the definition of the flow capacity, you can get the expression for the k_v of another liquid [4, 5]:

$$k_v = Q_v = Q_1 \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\Delta P_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_v}} = Q_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{1000 \cdot \Delta P_1}}.$$

A similar expression is given, for example, in the reference table [5], which also contains formulas for calculating the flow capacity of a valve that changes the flow rate of gas or water vapor.

Examples of flow capacity calculation are given in [1, 3, 4].

In the American calculation system, C_v is used instead of k_v , which is equal to the flow of water through the valve in gallons per minute at a pressure drop of 1 psi and a water temperature of 60 °F. The ratio of k_v and C_v values is as follows: $k_v=0,86 \cdot C_v$.

Dependencies listed in the reference table in Fig. 4 are approximate and valid only under certain conditions. More detailed dependencies and

conditions of their use are given in the standard ISA-75.01.01-2007 (IEC 60534-2-1 Mod) [6].

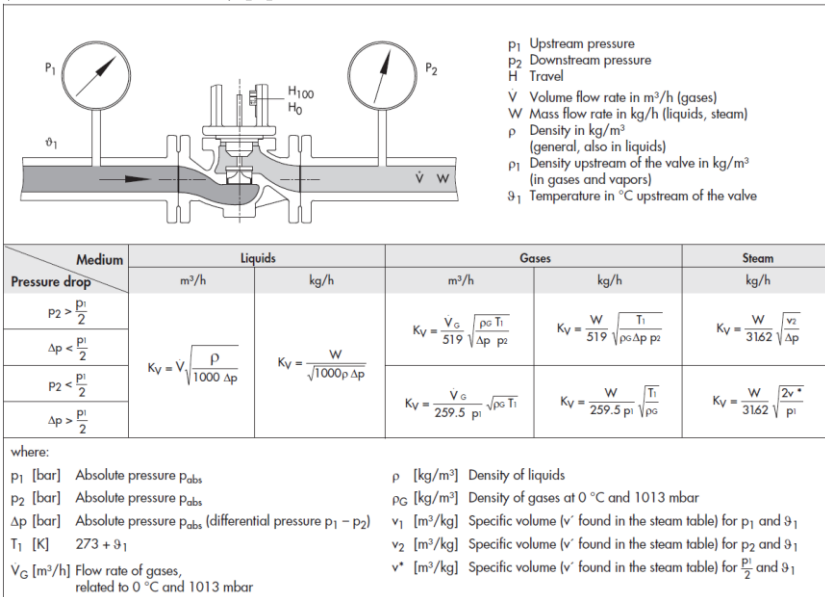


Fig. 4. Reference table for calculating k_V [4]

Next, we will consider the concept of the flow characteristic of RV. To do this, note that the total pressure losses in the pipeline network $P_0 - P_3$ consist of losses in the control valve $\Delta P = P_1 - P_2$ and losses in the pipeline ΔP_L (see Fig. 1). The ratio between ΔP and ΔP_L is characterized by the module n_V or valve authority a_V [3]:

$$n_V = \frac{\Delta P_L}{\Delta P}; \quad a_V = \frac{1}{1 + n_V}$$

During the operation of the valve, the type of its throughput characteristic usually changes significantly depending on the change in the hydraulic resistance of the network, the parameters of the substance (temperature, density, viscosity, etc.), which collectively leads to a change in the flow mode. Accordingly, the indicators n_V , a_V change, and, together with them, the appearance of the graphs of the flow characteristics of the valve (Fig. 5).

The throughput (ideal) characteristic of valve in working conditions is called the flow (real) characteristic, which is the dependence of the relative

volumetric Q_l/Q_{max} or mass G_l/G_{max} flow rates of the substance from the degree of opening of the regulating valve h/h_s [3].

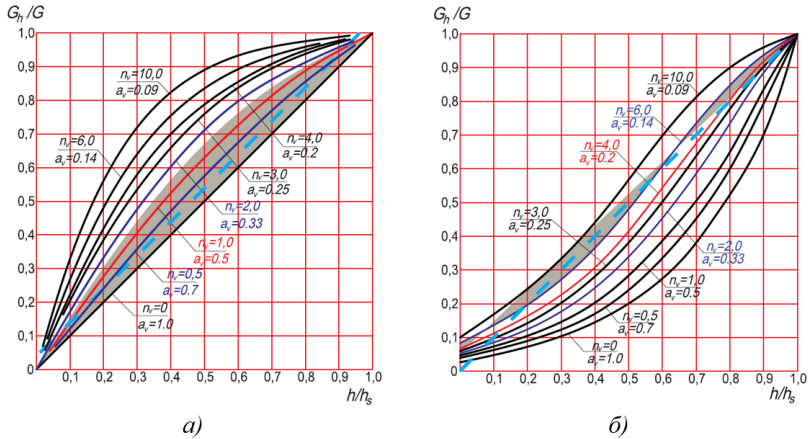


Fig. 5. Examples of flow characteristics depending on the degree of opening at different values of the module $n_v/$ authority a_v [3]:
 a) – for a valve with a linear throughput characteristic;
 b) – for a valve with an equal percentage throughput characteristic

The non-linear nature of the change in the flow characteristic naturally leads to a change in the K_{RV} transfer coefficient of the regulating valve, which in relative terms can be represented as:

$$K_{RV} = \frac{d(Q/Q_{max})}{d(h/h_s)} = \frac{dq}{dl}$$

In the process of operation, the throttling regulating valves must provide such a flow characteristic of the hydraulic system that the static characteristic of the control object (as a whole) is as close as possible to the linear one. Then the transmission coefficient K_O of the control object, which is the product of the transmission coefficients of the actuator K_{AC} , the regulatory valve K_{RV} , the technological unit K_{TU} and the sensor K_S , will change insignificantly, i.e.:

$$K_O = K_{AC} \cdot K_{RV} \cdot K_{TU} \cdot K_S \approx \text{const}.$$

Therefore, the designer faces the task of choosing such a valve with the transmission coefficient K_{RV} that would change minimally in the working range of the stroke of the rod $l=h/h_s=0,2 \dots 0,8$. For example, if the functioning of the control system requires a linear flow characteristic, then there is an alternative: for values of the $n_v \leq 1,5$ one should choose a valve with a linear throughput characteristic, and if $n_v \geq 3,0$ then a valve with an

equal percentage throughput characteristic (see Fig. 5). If an equal-percentage flow characteristic is required, then there is no alternative and one should choose a valve with an equal-percentage throughput characteristic. More detailed recommendations for choosing the type of flow characteristic are given in [3, 7].

When choosing the type and parameters of the valve, one should also take into account the possibility of harmful phenomena, namely noise and cavitation, associated with an increase in the speed of the liquid flow that flows through the valve. The result of these phenomena can be intensive wear of the surfaces of the throttling pair, the body, the rod and the sealing elements of the stuffing box, as well as a violation of the tightness in the throttling pair and flange connections. The conditions under which the listed phenomena occur are presented in fig. 6, *a* [1].

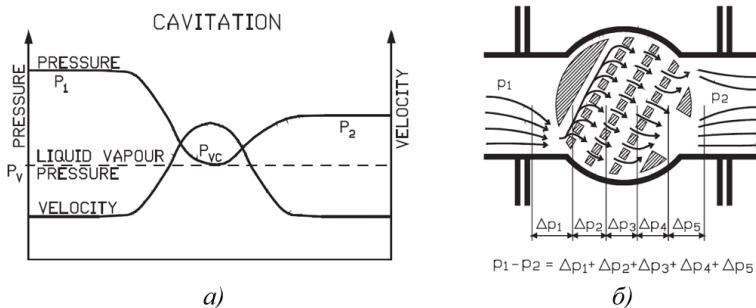


Fig. 6. Phenomena of noise and cavitation in valve [1]:

a) – conditions of occurrence; *b*) – an example of valve with a gradual decrease in the pressure drop across it

An increase in the flow rate of the liquid when it passes through the valve is accompanied by a decrease in the pressure in the throttle passage and can cause the phenomena of cavitation if the pressure falls below some critical P_v threshold. Cavities (caverns) filled with vapors or gases released from the liquid appear in the liquid flow. The occurrence of cavitation is accompanied by the occurrence of vibrations and noises, erosion of the surfaces of the shutters and seats, when the cavities snort near them. However, the most undesirable consequence of cavitation is a sharp increase in the hydraulic resistance of the throttle passage and, as a result, a weak dependence of the medium flow rate on the pressure drops across the valve. To avoid erosion of valve surfaces, it is necessary [1]:

- reduce the flow rate inside the valve using multi-stage pressure drop regulation by utilizing special valve structures (Fig. 6, b);

- reduce surface wear due to the use of stainless and hardened materials.

Thus, the most important modern trend in the development of the structures of regulating valves should be recognized as the division of the following functions in their design: flow control and throttling, i.e. extinguishing "excess" pressure drop. Accordingly, with the appearance of these two functions of regulating valves, the content, as well as calculation and software for choosing their size, changed. The new approach consists in choosing the type and size according to the following indicators:

- according to the degree of anti-cavitation or anti-noise protection;
- flow capacity k_v .

In general, it should be noted that the selection of throttling valve parameters requires a certain theoretical training and practical skills from the designer, which can and should be acquired using specialized software from manufacturers.

The purpose and tasks of the research - consider using the Fisher Valve Specification Manager and Metso Nelprof programs as examples for selecting parameters of throttling valves.

Throttling control valves automated calculation of parameters using Fisher VSM and Metso Nelprof programs was chosen as the research method.

Fisher Valve Specification Manager software offers a set of tools for calculating Fisher and Baumann control valves [8]. The calculation itself is performed on the 2-Valve Sizing tab, where the initial data for the calculation is specified, for example, for three options of changing the water flow through it (Fig. 7).

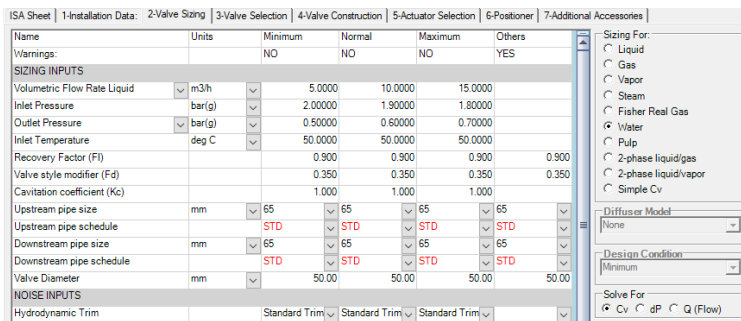


Fig. 7. Example of the data input in the Fisher VSM program

Next, on the 3-Valve Selection tab, the type of control valve is selected as well as its desired flow characteristics and *DN* size. At the same time, the program immediately displays possible options of the standard valve types and sizes (Fig. 8).

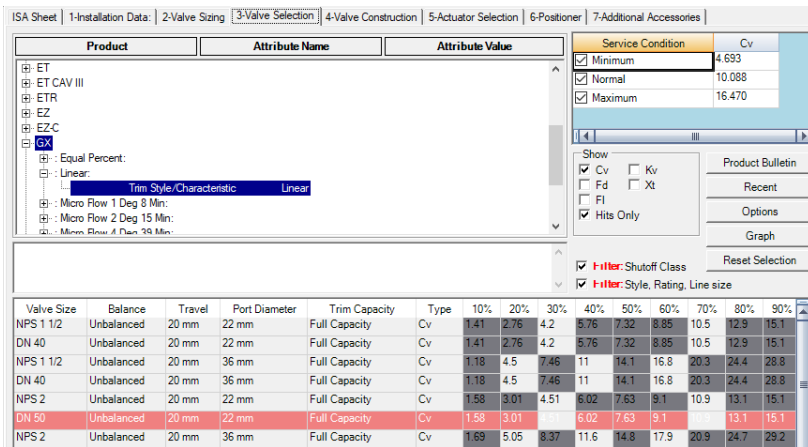


Fig. 8. Example of selecting the type of control valve in the Fisher VSM program

For the Fisher Valve Specification Manager, control valve parameter calculations can be obtained from the 2-Valve Sizing tab after clicking the Calculate button. By far the most important parameter is the flow capacity C_v . When ordering a valve, one should take C_v for maximum flow rates, and with a margin of up to 20 %. One should also pay attention to the speed of water flow through the valve, which should not exceed 2 m/s (Fig. 9).

On the 3-Valve Selection tab of the Fisher VSM program, after clicking on the Graph button, you can get graphs of the dependence of the throughput on the stroke of the control valve stem $C_v = f(l)$ (Fig. 10). In this case, for the selected valve of the GX type with a linear throughput characteristic, the stroke of the rod exceeds the permissible limits of 20 % ... 80 %. And this is undesirable, because beyond these limits the transmission coefficient of the valve can change significantly. Therefore, under such operating conditions, one should choose a different valve size.

Metso Nelprof software is an expert system for selecting control and shut-off valves. In addition to the calculation equations, it also includes expertise in the interpretation of the results. The program analyzes the selection and gives advice on the selection of control valves [9].

ISA Sheet 1-Installation Data: 2-Valve Sizing 3-Valve Selection 4-Valve Construction 5-Actuator Selection 6-Positioner 7-Additional Accessories				
Hydrodynamic Trim		Standard Trim	Standard Trim	Standard Trim
SIZING OUTPUTS				
Flow Coefficient (Cv)		4.693	10.088	16.470
Application Ratio		0.519	0.466	0.409
Pressure differential	bar	1.50000	1.30000	1.10000
Valve d(P)/1 pressure ratio		0.498	0.446	0.391
Choked flow pressure drop	bar	2.34385	2.25836	2.16836
Cavitation Pressure Drop	bar	2.88728	2.77970	2.66454
Liquid critical pressure drop ratio factor		0.95	0.95	0.95
Pipe and fitting flow correction factor		1.00	1.00	1.00
Combined recovery factor		0.90	0.90	0.90
Dynamic viscosity	mPa.s	0.547	0.547	0.547
Kinematic viscosity	SSU	2.509	2.509	2.509
Critical Pressure	bar(g)	219.62700	219.62700	219.62700
Upstream Inside Diameter	mm	62.71	62.71	62.71
Downstream Inside Diameter	mm	62.71	62.71	62.71
Vapor Pressure	bar(g)	-0.88949	-0.88949	-0.88949
Reynolds Number		117301.39	160204.70	188544.13
Liquid Specific Gravity		0.988	0.988	0.988
Inlet Density	kg/m3	988.13	988.13	988.13
Mass Flow Rate Liquid	kg/h	4936.2868	9872.5302	14808.7301
NOISE OUTPUTS				
Sound Pressure at 1m	dB(A)	< 50	< 50	< 50
VELOCITY OUTPUTS				
Fluid Velocity Upstream	m/s	0.4495	0.8989	1.3484
Fluid Velocity Downstream	m/s	0.4495	0.8989	1.3484

Fig. 9. Table of results control valve parameters calculations in the Fisher VSM program

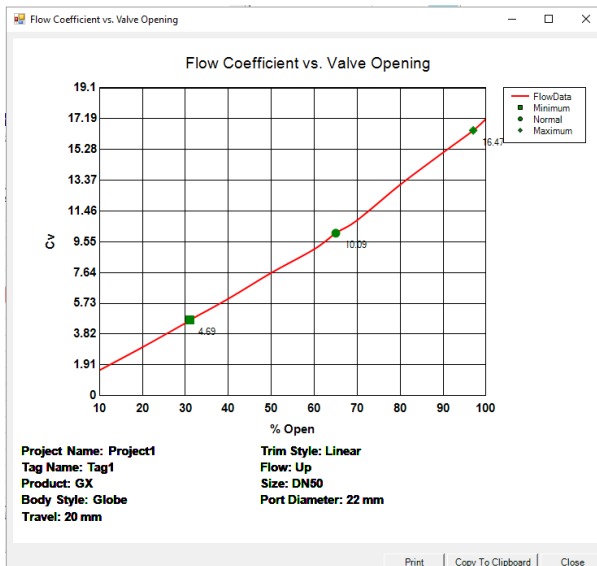


Fig. 10. Dependence graph $Cv = f(l)$ for a linear throughput characteristic

Input data for calculations is set in the Control tab, for example, for two options of changing water flow through a valve, the type of which is selected from the list that appears after clicking on the Valve button (Fig. 11).

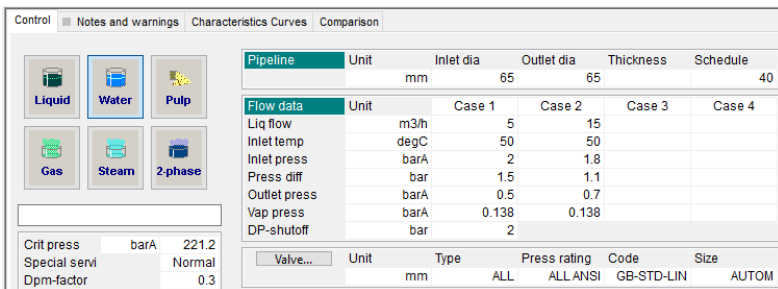


Fig. 11. Example of data entry in the Metso Nelprof program

For the Metso Nelprof program, calculation results can be obtained by clicking on the Calculate button (Fig 12).

Results	Unit	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Max capacity	Kv	22.49			
Req capacity	Kv	4.35	14.3		
Travel	%	19.4	64.2		
% of max cap.	%	19.4	63.4		
Noise	dB(A)[IEC]	55	68		
Flow velocity	m/s	0.71	2.12		
Terminal dp	bar	1.3	1.2		
FI coeff.		0.84	0.85		

Construction	Material	Seat	Gland pack	Metal
	630SS + HCr	std_Metal	PTFE + Carbol	Metal
	Class 2	Flow to Close	Fail to Close	Yes

Fig. 12. Table of results control valve parameters calculations in the Metso Nelprof program

When you go to the Characteristics Curves tab of the Metso Nelprof program, you can see graphs: inherent and installed characteristics of the selected GB-STD-LIN type valve (top in Fig. 13), the change in pressure and valve transmission coefficient depending on the stroke of the rod (bottom in Fig. 13).

In this case, it is noteworthy that the transmission coefficient of the selected GB-STD-LIN type valve changes insignificantly within 35 % ... 80 % of the stroke of the rod, therefore this valve can be recommended for use.

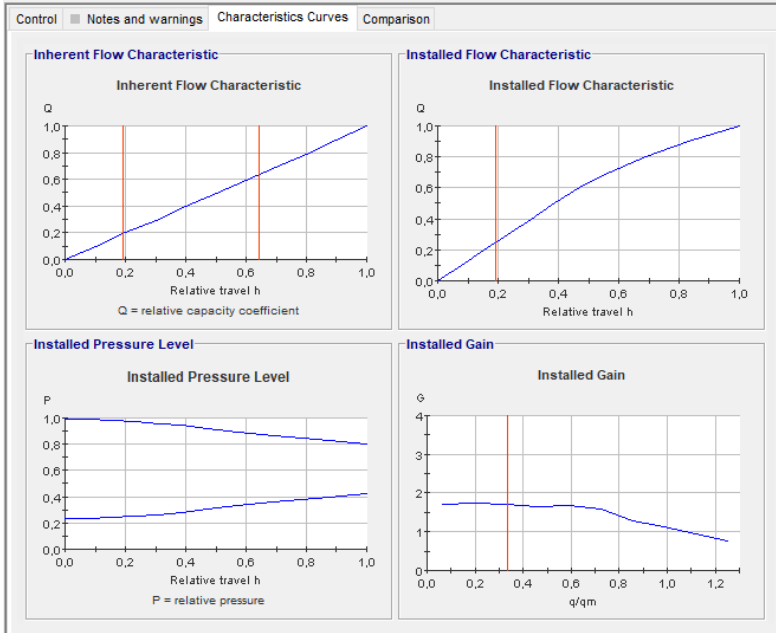


Fig. 13. Graphs of control valve characteristics in the Metso Nelprof program

Using the Fisher Valve Specification Manager and Metso Nelprof programs to select parameters of throttling RVs allows one to quickly obtain and analyze the results for several alternative options and choose the desired one.

The functionality of the Metso Nelprof program also allows one to view and select the type of actuator for the selected valve. The program is presented on the website of the manufacturer in the form of a WEB page, which simplifies its use.

The programs Fisher Valve Specification Manager and Metso Nelprof provide in a convenient form an opportunity to calculate the main parameters of throttling valves and choose a specific type that meets the technical requirements of its use, taking into account the limitations. These programs

allow designers of automatic control systems to develop skills in the selection of valves and actuators, to correctly place orders for the manufacturing company.

REFERENCES ЛІТЕРАТУРА

1. Flow control manual. Finland: Valmet Neles Finland Oy, 2020. – 169 p.
2. Control valve handbook, Fourth Edition. USA: Fisher Controls International LLC, 2005. – 297 p.
3. V. Pokotilov. Reguljujuchi klapani avtomatizovanih system teplo ta holodo postachanja. Viden: firma "HERZ Armaturen", 2017. – 232 p.
4. Handbook for control valve sizing. Technical bulletin 1-I. Italy: PARKOL S.p.A., 2016. – 24 p.
5. K_v coefficient Valve sizing. Application Notes AB 05 EN. Germany: SAMSON AG, 2012. – 2 p.
6. ISA-75.01.01-2007 (60534-2-1 Mod) Flow Equations for Sizing Control Valves. USA: ISA, 2007. – 72 p.
7. Korotkyi katakog produkzii Fisher. USA: EMERSON, 2018. – 244 p.
8. Quick Start Guide Fisher Specification Manager. USA: Fisher Controls International LLC, 2012. – 28 p.
9. NELPROF 6.2 user's guide. Finland: Metso, 2010. – 77 p.

***Анотація.** При проектуванні нових систем автоматичного керування технологічними процесами виникає необхідність вибору типу і розрахунку параметрів дросельних регулюючих органів (РО). З точки зору гідравліки дросельний РО являє собою складний змінний місцевий опір. В технічній документації виробники вказують пропускну здатність РО та його пропускну характеристику. Вона може бути, наприклад, лінійною, рівнопроцентною, що в основному залежить від конструкції сідла та плунжера. У процесі роботи РО вид його пропускну характеристики звичайно суттєво змінюється залежно від зміни гідравлічного опору мережі, параметрів речовини (температури, щільності, в'язкості та ін.), що в сукупності приводить до зміни режиму руху потоку. Відповідно змінюється вигляд графіків пропускну характеристики РО. Тому пропускну (ідеальну) характеристику РО в робочих умовах прийнято називати витратною (реальною) характеристикою. Нелінійний характер зміни витратної характеристики звісно приводить до зміни коефіцієнта передачі регулюючого органу. При виборі типу і параметрів клапану*

слід також зважати на можливість виникнення шкідливих явищ, а саме шуму і кавітації, пов'язаних з зі збільшенням швидкості потоку рідини, яка протікає крізь РО. Результатом цих явищ може стати інтенсивне зношування поверхонь дросельної пари, корпусу, штока і ущільнювальних елементів сальника, а також порушення герметичності в дросельній парі і фланцевих з'єднаннях. В цілому слід зазначити, що вибір параметрів дросельних РО потребує від проектувальника певної теоретичної підготовки і практичних навичок, які доцільно набуті, використовуючи спеціалізовані програми від фірм-виробників. Програмне забезпечення Fisher Valve Specification Manager пропонує набір інструментів для розрахунків регулюючих клапанів Fisher і Baumann. Програмне забезпечення Metso Nelprof – це експертна система вибору регулюючих та запірних клапанів. Використання програм Fisher Valve Specification Manager та Metso Nelprof для вибору параметрів дросельних РО дозволяє швидко отримати та проаналізувати результати для декількох альтернативних варіантів та обрати бажаний. Функціонал програми Metso Nelprof дозволяє також розглядати та обрати тип виконавчого механізму для обраного клапану. Програма представлена на сайті фірми-виробника у вигляді WEB-сторінки, що спрощує її застосування. Програми Fisher Valve Specification Manager та Metso Nelprof у зручній формі надають можливість провести розрахунки основних параметрів дросельних клапанів та обрати конкретний тип, який задовольняє технічним вимогам його використання з урахуванням обмежень. Дані програми дозволяють сформувати у проектувальників систем автоматичного керування навички з вибору клапанів та виконавчих механізмів, коректно скласти замовлення для фірми-виробника.

РЕФЕРАТИ

УДК 681.518.5:681.586.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-03-12

Богач В. М., Опришко М. О. Вдосконалення автоматизованого засобу контролю процесу мащення циліндрових втулок // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 3 – 12.

Л. 1. Список літ.: 19 назв.

Обґрунтовано схематичне рішення пристрою контролю мащення поверхонь деталей циліндро-поршневої групи суднових двигунів внутрішнього згоряння. У запропонованому пристрої забезпечена більш адекватне визначення зміни режимів мащення та перетворення параметрів плівки мастила у зміни інформаційного сигналу, а також компенсація впливу дестабілюючих факторів на вимірювальний канал пристрою.

Ключові слова: мастило, гільза циліндра, оптоволоконний пристрій.

Fig. 1. Refer: 19.

The schematic and technical solution of the device for controlling the lubrication of the surfaces of parts of the cylinder-piston group of internal combustion marine engines is substantiated. The proposed device provides a more adequate determination of the change in lubrication modes and the transformation of the parameters of the lubricant film into changes in the information signal, as well as compensation for the influence of destabilizing factors on the measuring channel of the device.

Key words: lubrication, cylinder sleeve, fiber-optic device.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-13-24

Будуров М. І. Перспективні шляхи покращення екологічності суден торгового флоту // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 13 – 24.

Табл. 1. Список літ.: 28 назв.

Обґрунтовано перспективні шляхи забезпечення екологічних вимог у судноплавній галузі з урахуванням особливостей морського та внутрішнього водного транспорту. Проаналізовані кількісні показники шкідливих викидів для різних типів суднових приводів. Показана ефективність впровадження перспективних рішень щодо скорочення викидів від судноплавної галузі з метою відповідності міжнародним екологічним нормам.

Ключові слова: міжнародне суднопластво; торгове судно; суднові енергетичні установки; сучасні суднові дизелі; транспортування з нульовими викидами; парникові гази; викиди в атмосферу.

Tab. 1. Refer: 28.

The perspective ways for ensuring environmental requirements have been substantiated taking into account the peculiarities of maritime and internal water transport. Analyzed a quantitative indicators of harmful air emissions from various types of vessel's prime movers. The effectiveness of implementing the promising solutions regarding reducing emissions from the world shipping industry in order to comply with international environmental standards.

Keywords: international shipping industry; merchant vessel; ship's power plants; modern marine diesel engines; zero emissions transportation; greenhouse gas; air pollution.

УДК 621.317.39:681.586.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-25-32

Голіков В. А. Автоматизований пристрій для контролю повітряного середовища на судах // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 25 – 32.

Л. 1. Список літ.: 15 назв.

Обґрунтовано схемотехнічне рішення датчику визначення температури точки роси. У пропонуваному пристрої забезпечена використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання. Засіб забезпечує підвищення вірогідності процесів контролю повітряного середовища на судах з метою забезпечення комфортних умов життєдіяльності екіпажу.

Ключові слова: точка роси, волоконна оптика

Fig. 1. Refer: 15.

The technical solution of the sensor for determining the dew point temperature is substantiated. The proposed device ensures the use of principles of partial invariance to external uncontrolled influences on measurement. The tool ensures an increase in the probability of air environment control processes on ships in order to ensure comfortable living conditions for the crew.

Key words: dew point, fiber optics.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-33-42

Горб С. І., Сагайдак О. І., Горб О. С. Використання штучного інтелекту для оцінки ризиків на морських судах // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 33 – 42.

Табл. 1. Список літ.: 8 назв.

Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден та запобіганням забруднення вимагає "оцінити всі ідентифіковані ризики, пов'язані з суднами, персоналом та доквіллям та організувати відповідний захист від них". Виконане дослідження дозволило визначити можливості штучного інтелекту для адміністрування ризиками на судах та показало його

ефективність. Наведено приклад використання ChatGPT для ідентифікації небезпек у конкретній судновій операції, а також для оцінки у кожній небезпеки: категорії збитків, категорії її імовірності та категорії ризику. Для ризиків високої та середньої категорій ChatGPT запропонував заходи захисту та оцінив ефективність запропонованих заходів.

Ключові слова: ISM Code; ризик; штучний інтелект; суднові операції; безпека судноплавства.

Tab. 1. Refer: 8.

The International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention requires that "assess all identified risks to ships, personnel and the environment and establish appropriate safeguards". The conducted research identified the potential of artificial intelligence in risk management for ships and demonstrated its effectiveness. As an example, was provided use of ChatGPT for identifying hazards in specific ship operation. Additionally, it assessed each hazard's damage category, probability category and risk category. For risks classified as high and medium, ChatGPT proposed protective measures and evaluated the effectiveness of these measures.

Key words: ISM Code; risk; artificial intelligence; ship operations; shipping safety.

УДК 614.72:547.381-074:543.544.45

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-43-53

Журавльов Ю. І., Сандлер А. К., Карпілов О. Ю., Хнюнін С.Г. Вдосконалення засобу контролю повітряного середовища у машинному приміщенні при роботі з вуглеводневими речовинами // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 43 – 53.

Л. 3. Список літ.: 12 назв.

Обґрунтовано схемотехнічне рішення засобу контролю рівня забруднення повітря суднових машинних приміщень шкідливою речовиною акролеїном. У запропонованому пристрої забезпечена більш адекватна локалізація появи акролеїна та перетворення параметрів газового середовища у зміни інформаційного сигналу, а також компенсація впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику акролеїна. Визначені геометричні параметри складового елемента пристрою – фокону.

Ключові слова: акролеїн, волоконно-оптичний датчик, фокон.

Fig. 3. Refer: 12.

A well-founded circuit-technical solution of a means of controlling the level of air pollution in ship's engine rooms with the harmful substance acrolein. In the proposed device, a more adequate localization of the appearance of acrolein and transformation of parameters of the gas environment into changes in the information signal, as well as compensation for the influence of destabilizing factors on the measuring channel of the acrolein sensor, are ensured. The geometric parameters of the constituent element of the device - the focon are determined.

Key words: acrolein, fiber optic sensor, focon.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65

Заблоцький Ю. В., Будашко В. В., Сагін А. С. Забезпечення технологічних операцій зі зрідженням природним газом під час його видобутку в морських прибережних акваторіях // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 54 – 65.

Табл. 1. Список літ.: 24 назв.

Визначено, що розробка великих газових родовищ на морському шельфі стикається з високими витратами та технічними викликами. Як варіант розв'язання цих проблем впроваджують автономні плавучі заводи зрідженого природного газу. Спорудження подібних заводів найбільш доцільно виконувати за модульною стратегією побудови, відповідно до якої більша частина робіт виконується на заводі, а подальша збірка готових модулів відбувається безпосередньо на морських платформах, що забезпечують видобуток газу в морських прибережних акваторіях.

Ключові слова: автономні плавучі заводи зрідженого природного газу, зріджений природний газ, морський транспорт, судна-газовози, транспортування зрідженого природного газу.

Tabl. 1. Refer: 24.

It was determined that the development of large gas fields on the sea shelf faces high costs and technical challenges. Autonomous floating liquefied natural gas plants are being implemented as a solution to these problems. The construction of such plants is most expedient to be carried out according to the modular construction strategy, according to which most of the work is carried out at the plant, and the subsequent assembly of ready-made modules takes place directly on marine platforms that ensure gas production in coastal sea areas.

Key words: autonomous floating plants of liquefied natural gas, gas carriers, liquefied natural gas, sea transport, transportation of liquefied natural gas.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-66-76

Колегаєв М. О., Бражнік І. Д. Вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 66 – 76.

Лл. 5. Список літ.: 14 назв.

Розглянуті питання щодо вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій. Зазначено, що ефективність експлуатації нафтоналивних суден крім транспортних операцій, визначається технологіями, які використовуються під час підготовки судна до прийому нового вантажу. Однією з таких технологій є інертизація вантажних танків. Метою досліджень було вдосконалення системи інертних димових газів нафтоналивного судна. Встановлено, що суттєве скорочення часу інертизації

досягається за рахунок комбінованого використання чотирьох периферійних та одного центрального сопла для введення інертних газів у вантажний танк нафтоналивного судна.

Ключові слова: вантажні операції, інертні димові гази, концентрація кисню, кут розкриття струменю, морський транспорт, нафтоналивне судно, система інертних газів.

Fig. 5. Refer: 14.

Considered issues related to the improvement of the process of preparing cargo tanks of oil tankers for cargo operations. It is noted that the efficiency of the operation of oil tankers, in addition to transport operations, is determined by the technologies used during the preparation of the vessel to receive a new cargo. One of such technologies is the inertization of cargo tanks. The aim of the research was to improve the inert flue gas system of the oil tanker. It was established that a significant reduction in the inertization time is achieved due to the combined use of four peripheral and one central nozzle for the introduction of inert gases into the cargo tank of an oil tanker.

Key words: cargo operations, inert flue gases, inert gas system, jet opening angle, marine transport, oil tanker, oxygen concentration.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-77-91

Матейко О. В. Забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса : НУОМА. – С. 77 – 91.

Табл. 5. Іл. 5. Список лит.: 23 назв.

Надані результати досліджень, щодо забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів. Визначено, що інертизація неможлива без утворення у вантажному танку поділяючого шару, який шар попереджує сумішоутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, та виконує функції «поршню» за допомогою якого здійснюється витиснення залишків парів вантажу з вантажного танку. Експериментально встановлені значення тиску нагнітання інертного газу за яким процес інертизації здійснюється за найкоротших час з одночасним забезпеченням суцільності та стійкості поділяючого шару.

Ключові слова: генератор інертних газів, зріджений природний газ, інертизація вантажних танків, концентрація, мікроконтролери, морський транспорт, поділяючий шар, судна-газовози, тиск.

Tabl. 5. Fig. 5. Refer.: 23.

The results of research on ensuring the process of inertization of cargo tanks of gas carriers are provided. It was determined that inertization is impossible without the formation of a separating layer in the cargo tank, which layer prevents the formation of a mixture between the cargo vapors remaining in the cargo tank and the inert gas, and performs the functions of a "piston" with the help of which the

remaining cargo vapors are pushed out of the cargo tank. Experimentally determined values of the inert gas injection pressure according to which the inertization process is carried out in the shortest time while simultaneously ensuring the continuity and stability of the dividing layer.

Key words: concentration, generator of inert gases, inertization of cargo tanks, liquefied natural gas, microcontrollers, sea transport, separating layer, gas carriers, pressure.

УДК 681.518.5:681.586.5

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

Сандлер А. К., Веретенник О. М. Технічне діагностування суднових холодильних установок на основі волоконно-оптичних технологій // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 92 – 103.

Л. 4. Список літ.: 10 назв.

Обґрунтовано схемотехнічне 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 схемотехнічних рішень датчиків відомих типів. Розроблено математичний опис процесу перетворення оптичної потужності у датчику. Обґрунтовано застосування скла зв штучного сапфіру для виготовлення елементів датчику.

Ключові слова: суднова холодильна установки, волоконно-оптичний датчик, хлорид кобальту.

Fig. 4. Refer: 10.

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.

Keywords: ship refrigerating installation, fiber optic sensor, cobalt chloride.

УДК 621.373.826

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-104-113

Сандлер А. К., Палагін О. М. Вдосконалення адаптивного дзеркала суднових оптико-локаційних станцій // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 104 – 113.

Л. 3. Список літ.: 14 назв.

Обґрунтовано схемотехнічне рішення адаптивного дзеркала суднової оптико-локаційної станції. У запропонованому дзеркалі відсутня необхідність корекційних дій з підтримки оптичних властивостей всіх елементів лінзи під впливом експлуатаційних чинників, розширений діапазону режимів роботи й одночасно можлива незалежна зміна оптичних властивостей різних поверхні. Обґрунтовано застосування ніобату літію для виготовлення елементів дзеркала.

Ключові слова: суднова оптико-локаційна, адаптивне дзеркало.

Fig. 3. Refer: 14.

The schematic solution of the adaptive mirror of ship optical location stations is substantiated. In the proposed mirror, there is no need for corrective actions to maintain the optical properties of all lens elements under the influence of operating factors, the range of operating modes is expanded, and at the same time, independent changes in the optical properties of various surfaces are possible. The use of lithium niobate for the manufacture of mirror elements is substantiated.

Keywords: ship optical location, adaptive mirror.

UDC 681.53/.54

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-114-127

Levynskyi Maksym, Levynskyi Valeryi Automated parameter selection for throttling control valves // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 114 – 127.

Fig. 13. Refer: 9.

When designing new systems for automatic control of technological processes, there is a need to choose the type and calculate the parameters of throttle regulating bodies (RO). Therefore, the throughput (ideal) characteristic of RO in working conditions is called the consumption (real) characteristic. Selection of throttle RO parameters requires a certain theoretical training and practical skills from the designer, which should be acquired using specialized programs from manufacturers. These programs allow designers of automatic control systems to develop skills in the selection of valves and actuators, to correctly place orders for the manufacturing company.

Keywords: throttling control valves, Fisher VSM, Metso Nelprof, capacity, programs.

Лл. 13. Список літ.: 9 назв.

При проектуванні нових систем автоматичного керування технологічними процесами виникає необхідність вибору типу і розрахунку параметрів дросельних регулюючих органів (РО). Вибір параметрів дросельних РО потребує від проектувальника певної теоретичної підготовки і практичних навичок, які доцільно набути, використовуючи спеціалізовані програми від фірм-виробників. Дані програми дозволяють сформувати у проектувальників систем автоматичного керування навички з вибору клапанів та виконавчих механізмів, коректно скласти замовлення для фірми-виробника.

Ключові слова: дросельні регулюючі клапани, Fisher VSM, Metso Nelprof, пропускна здатність, програми.

ЗМІСТ

Богач В.М., Опришко М.О. Вдосконалення автоматизованого засобу контролю процесу мащення циліндрових втулок	3
Будуров М.І. Перспективні шляхи покращення екологічності суден торгового флоту	13
Голіков В.А. Автоматизований пристрій для контролю повітряного середовища на судах	25
Горб С.І., Сагайдак О.І., Горб О.С. Використання штучного інтелекту для оцінки ризиків на морських судах	33
Журавльов Ю.І., Сандлер А.К., Карпілов О.Ю., Хнюнін С.Г. Вдосконалення засобу контролю повітряного середовища у машинному приміщенні при роботі з вуглеводневими речовинами	43
Заблоцький Ю.В., Будашко В.В., Сагін А.С. Забезпечення технологічних операцій зі зрідженим природним газом під час його видобутку в морських прибережних акваторіях	54
Колегаєв М. О., Бражнік І. Д. Вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій	66
Матейко О. В. Забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів	77
Сандлер А.К., Веретеннік О.М. Технічне діагностування суднових холодильних установок на основі волоконно-оптичних технологій	92
Сандлер А.К., Палагін О.М. Вдосконалення адаптивного дзеркала суднових оптико-локаційних станцій	104
Levinskyi Maksym, Levinskyi Valery Automated parameter selection for throttling control valves	114
Реферати	128

ПРАВИЛА
оформлення та подання рукописів для збірника
"Автоматизація суднових технічних засобів"

1. Рукопис подається в електронному вигляді українською або англійською мовами: текст у форматі *.docx, набраний на аркушах формату А5 кегелем 10, гарнітура Times New Roman. Використання списків у редакторі Word не дозволяється. Рукопис має бути підписаний усіма авторами.

2. Обсяг статті (з ілюстраціями, підписуваними підписами та резюме українською та англійською мовами) не повинен перевищувати 1,5 авторського листа.

3. На першій сторінці рукопису мають бути рядково вказані: індекс УДК; ПІБ авторів; найменування установи, в якій виконувалася робота; адреси електронної пошти авторів; назва статті; резюме українською та англійською мовами по 500 – 900 символів. Наприкінці рукопису наводиться реферат двома мовами – українською та англійською, – що включає ПІБ авторів, назву статті, кількість таблиць, ілюстрацій та найменувань списку літератури, резюме та ключові слова.

Якщо рукопис не є повністю англійським, він супроводжується анотацією англійською мовою не менше 1800 знаків, включаючи ключові слова. Якщо рукопис не є повністю українським, він супроводжується анотацією українською мовою обсягом не менше 1800 знаків, включаючи ключові слова.

4. Таблиці друкуються в тексті і повинні бути забезпечені заголовками, що пояснюють. Посилання на таблиці даються у скороченому вигляді (таб.).

5. У формулах, літерних позначеннях та індексах латинський шрифт повинен мати нахил (за винятком тригонометричних функцій), а грецький шрифт та кирилиця мають бути набрані прямим шрифтом. Нумеруються лише формули, на які є посилання у тексті. Одиниці фізичних величин повинні відповідати ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97, ДСТУ 3651.2-97 "Метрологія. Одиниці фізичних величин" та мати загальноприйняті позначення.

6. Бібліографічний опис літератури має відповідати ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання (ГОСТ 7.1–2003).

7. Текст статей має відповідати вимогам постанови Президії ВАК України від 15.01.03 № 7-05/1 "Про підвищення вимог до спеціальних видань, внесених до переліків ВАК України": «... постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку».

Підписано до друку 28.11.2024.

Формат 60×84 1/16. Папір офсетний №1. Гарнітура Times New Roman.

Ум. піч. л. 12,2. Тираж 50 екз. Замовлення №

НУОМА

Свідоцтво ДК №1292 від 20.03.2003

65052, г. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 7, к. 206

Тел./факс: (0482) 34-14-12

publish@onma.edu.ua