

10.31653/smf48.2024.18-30

Будашко В.В., Заблоцький Ю.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ЦИКЛІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ПІД ЧАС ЙОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ МОРСЬКИМИ СУДНАМИ-ГАЗОВОЗАМИ

Постановка проблеми в загальному вигляді. В останнє десятиріччя природний газ розглядається як основне джерело енергії для багатьох типів енергетичних установок. Скритий «недолік» природного газу – необхідність його транспортування від міста видобутку до споживачів. Найбільш ефективною технологією, яка дозволяє транспортувати великі об'єми природного газу – є його зрідження. Зріджений природний газ (ЗПГ) – криогенна рідка багатокомпонентна суміш легких вуглеводнів, основу якої становить метан. Транспортування ЗПГ може здійснюватися або континентальними шляхами – трубопровідним способом, або океанськими / морськими – суднами-газовозами [1-3].

Склад ЗПГ відрізняється від складу природного газу. Щоб отримати ЗПГ з природного газу, спочатку видаляють етан, пропан, бутан і більш важкі вуглеводні, потім його очищають від вуглекислого газу і сірководню, а потім осушують – видаляють вологу. Газоподібний метан, що залишився, може як домішки мати 3...4 % етану, 2...3 % пропану, до 2 % бутану і до 1,5 % азоту. Якщо цю суміш метану з іншими газами охолодити приблизно до температури -160°C за тиском трохи більше атмосферного (температура кипіння чистого метану за атмосферним тиском $-161,5^{\circ}\text{C}$), він перетворюється на рідину. Це і є ЗПГ. Зразкові склади природного газу та ЗПГ наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Зразкові склади природного газу та ЗПГ

Елемент	Природний газ, мольні %	ЗПГ, мольні %
Метан	62,6...98,8	86,98...99,72
Етан	2,89...7,06	0,06...9,35
Пропан	0,05...2,1	0,0005...2,33
Бутан	0,03...1,04	0,0005...2,33
Вуглекислий газ	0,03...2,25	—
Азот	0,43...28	до 1,5
Гелій	до 0,58	—

ЗПГ є безбарвною рідиною без запаху, густина якої вдвічі менша за густину води – ЗПГ може плавати на поверхні води, не змішуючись з нею. У рідкому стані він токсичний, не агресивний. За відсутності джерела займання ЗПГ швидко випаровується та розсіюється, не залишаючи слідів. Після розливу ЗПГ на землі або на воді немає необхідності проводити екологічне очищення. Деякі фізико-хімічні властивості ЗПГ наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Фізико-хімічні властивості ЗПГ

Властивості	Одиниця виміру	Значення
Молекулярна маса	кг/моль	16,3
Температура кипіння	К / °С	111,7 / –161,5
Температура плавлення	К / °С	90,7 / –182,5
Критична температура	К / °С	191,1 / –82,1
Критичний тиск (за 20° С)	МПа	4,3
Густина рідини	кг/м ³	424,5
Густина газу (за 20° С)	кг/м ³	0,667

Обсяг ЗПГ у 600 разів менший від обсягу природного газу, що полегшує зберігання та забезпечує можливість його транспортування на великі відстані. При цьому постійно необхідно вирішувати питання забезпечення транспортування ЗПГ з найбільшою енергетичною ефективністю та найменшими втратами ЗПГ, що пов'язані з його випаровуванням. Особливо ці питання актуальні для морського транспорту, судна-газовози якого здійснюють тривали перевезення ЗПГ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час випаровування природний газ може спалахнути, якщо відбудеться контакт з джерелом полум'я або окислювачем. Для займання необхідно мати концентрацію випарів у повітрі 5...15 % (за нормальних умов). Якщо концентрація до 5 %, то випарів недостатньо для початку займання, а якщо більше 15 %, то в повітрі стає замало кисню, необхідного для займання газової суміші [4-6].

У випадку розливу ЗПГ на поверхні землі холодні пари, що утворюються, конденсують на себе вологу з повітря і стають помітними, формуючи білі хмари на поверхні землі. У міру того, як пари ЗПГ нагріваються, хмари розчиняються і знову стають невидимими.

Відносна густина метану по відношенню до повітря за температурою доквілля близько 0,6, тому за нормальних умов газоподібний метан легко піднімається від поверхні землі. Пари ЗПГ за атмосферним тиском і температурою кипіння –162°С мають відносну густину 1,8, яка означає, що в цих умовах пари ЗПГ важчі за повітря і будуть

накопичуватися під час розливу біля поверхні землі або води. Однак, пари ЗПГ швидко нагріваються, та у випадку досягнення температури -110°C їх відносна густина стає рівною 1, пари починають швидко підніматися. Отже, холодні пари ЗПГ у разі локалізації у поверхні землі за холодної погоди становлять небезпеку для дихання, оскільки за збереження негативної плавучості повітря пари ЗПГ витісняють кисень [7-9].

Температура самозаймання ЗПГ залежить від його складу і знаходиться в межах $540\ldots 600^{\circ}\text{C}$, що значно вище, ніж у дизельного палива. Температура полум'я під час згоряння ЗПГ вища, ніж в інших видів палива. Під час згоряння ЗПГ утворюється в середньому $50,2$ МДж/кг теплоти – це вище, ніж під час згоряння дизельного палива, значення якої складає $42,4$ МДж/кг. Згоряючи, ЗПГ виробляє, в основному, вуглекислий газ і водяну пару, тому використання ЗПГ як паливо більш сприятливо для екології в порівнянні з іншими видами палива [10-12].

Для споживачів зниженого природного газу велике значення має такий показник, як найвища теплотворна здатність – кількість тепла, що утворюється під час згоряння одного кубічного метра газу за атмосферним тиском і температурою 15°C . ЗПГ продається та купується на підставі показника теплотворної здатності, значення якої залежить від складу ЗПГ [13-15]. Наявність у ЗПГ азоту знижує його теплотворну здатність, а присутність етану та інших більш важких вуглеводнів підвищує цей показник. У різних країнах прийнято різні стандарти вищої теплотворної здатності, звідси і такий розкид у вимогах до складу ЗПГ. Вимоги Японії до якості ЗПГ за показником вищої теплотворної здатності перебувають у діапазоні $39,7\ldots 43,3$ МДж/м³, Іспанії – $35,0\ldots 44,9$ МДж/м³. Специфікації теплотворної здатності ЗПГ за різними країнами представлені в табл. 3.

Таблиця 3. Вимоги до теплотворної здатності ЗПГ країн світу

Країна	Теплотворна здатність, МДж/м ³	
	Мінімум	Максимум
Японія	39,7	43,3
Корея	40,0	43,7
США	35,8	40,8
Великобританія	36,7	42,4
Франція	36,2	43,3
Іспанія	35,0	44,9

Постановка завдання. В зв'язку з вищевикладеним завданням досліджень був аналіз термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Метод транспортування природного газу в зрідженому стані є значно економічним, ніж трубопровідний, починаючи з відстаней до споживачів газу більше 2000...3000 км, але потребує більш високих початкових вкладень в інфраструктуру, ніж трубопровідний. Основну вартість в цьому випадку складе не транспортування, а вантажно-розвантажувальні роботи. До переваг цього методу відноситься також той факт, що зріджений газ більш безпечний під час перевезення та зберігання, ніж стислий. ЗПГ може бути доставлений з будь-якого заводу зі зрідження на будь-який регазифікаційний термінал. Крім того, це єдина технологія для трансокеанських перевезень [16-18].

Якщо перейти від глобальних логістичних схем постачання ЗПГ до менш масштабних, то ЗПГ може розв'язати проблему газифікації регіонів віддалених від магістральних газопроводів. За умовою створення ізотермічних сховищ ЗПГ та невеликих регазифікаційних установок, що є невеликими трубчастими випарниками, доставка ЗПГ може бути здійснюватися автомобільним, внутрішнім водним або залізничним транспортом, обладнаним криогенними цистернами.

У промислових процесах технології охолодження та зрідження природного газу відіграють ключову роль. За період існування світової промисловості зрідженого газу було розроблено кілька технологій промислового зрідження газу. Ряд процесів знайшли різною мірою своє застосування, деякі з них досі існують лише у проекті [19].

Для виробництва ЗПГ беруть потік природного газу за високим тиском, видаляють з нього небажані домішки, охолоджують газ до дуже низької температури, потім дроселюють його до атмосферного тиску, при цьому газ охолоджується до заданої кінцевої температури, конденсується і перетворюється на ЗПГ [20-22].

Якщо подивитися на криву охолодження природного газу в координатах тепло-температура за тиском 3,7 МПа від температури доквілля 10°C...20°C до температури конденсації метану -162°C, то можна побачити, що на початку охолодження йде по прямій лінії (рис. 1). Протягом цієї ділянки кривої охолодження конденсуються переважно важкі вуглеводні.

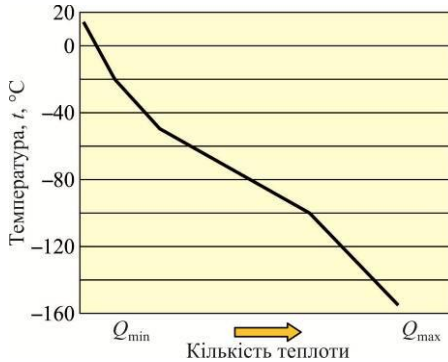


Рис. 1. Крива охолодження природного газу

Фактично, в діапазоні $-50\dots-56^\circ\text{C}$ більша частина пропану і більш важких компонентів випаде з потоку газу. Зі зниженням температури крива охолодження змінює напрямок. Ця зміна відбувається на початку конденсації етану та метану. У випадку зниження температури до -140°C практично вся газова суміш, крім парів азоту, перетворюється на рідкий стан.

Методи охолодження та конденсації газу можуть сильно відрізнятися в залежності від того, який процес охолодження використовується [23, 24].

На рис. 2 зображені принципові схеми простого одноступеневого (а) та багатоступеневого (б) циклів охолодження, які використовуються під час зрідження природного газу.

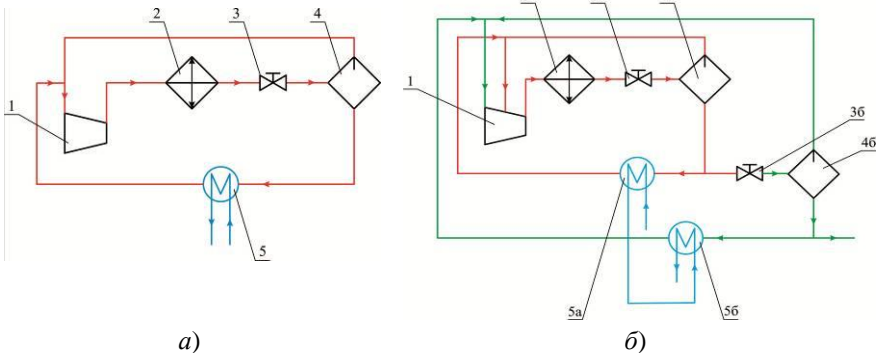


Рис. 2. Цикли охолодження ЗПГ:

а – одноступеневий цикл; б – багатоступеневий цикл;

1 – компресор; 2 – холодильник-конденсатор із зовнішнім охолодженням;
3а, 3б – дросель; 4а, 4б – сепаратор; 5а, 5б – холодильник-випарник для охолодження природного газу

Розглянемо як приклад простий пропановий цикл, що використовує пропан як холодильний агент при температурі близько -30°C (рис. 2, *a*). У компресорі 1 пропан стискається від тиску всмоктування $0,17\text{ МПа}$ до тиску на виході $1,8\text{ МПа}$. Тиск на всмоктуванні компресора завжди має бути більшим за атмосферний з метою виключення підсмоктування навколишнього повітря в лінію подачі газу. Нагрітий під час стиснення газ від температури $80\dots 85^{\circ}\text{C}$ охолоджується в холодильнику 2 зовнішнім холодоагентом (водою або навколишнім повітрям) до температури близько 50°C та конденсується. Далі під час проходження через дросель тиск газу скидається до рівня $0,17\text{ МПа}$ (тиск всмоктування компресора), при цьому пропан охолоджується до -30°C . У сепараторі 4 пропан розділяється на рідку і парову фази, парова фаза повертається в компресор, а рідка фаза подається у випарник 5, де пропан випаровується, а природний газ при цьому охолоджується. Випарений пропан повертається до компресора 1.

Якщо подивитися на рис. 2, *b* можна побачити, що до схеми простого одноступеневого циклу на лінії подачі рідини у випарник-холодильник 5а поставлений дільник потоку, і на відділений потік рідини поставлений другий дросель 3б. Цей відокремлений потік утворює другий рівень охолодження з нижчою температурою та нижчим тиском. Таким чином, у схемі присутні два рівні тиску потоків пропану, що подаються на всмоктування компресор, і два температурних рівня для охолодження природного газу.

Якщо розвивати цю схему далі, можна додати третій, четвертий чи п'ятий рівень. Збільшення кількості температурних рівнів, тобто збільшення числа ступенів в одному температурному діапазоні, наближає криву охолодження холодоагенту до кривої охолодження газу, що робить процес більш ефективним. Число рівнів охолодження – це компроміс між капітальними вкладеннями, складністю технологічної схеми та експлуатаційними витратами. На сьогодні максимально застосовувалося п'ять рівнів охолодження для однокомпонентного холодильного агента. Вочевидь, що з додаванням ступенів охолодження збільшується кількість температурних рівнів. Зрештою, можна використовувати один з цих ступенів охолодження для конденсації іншого холодильного агента, що застосовується в каскадних процесах зрідження природного газу [25, 26].

Розглянемо також графік залежності тиску насиченої пари метану, етилену та пропану від температури (рис. 3).

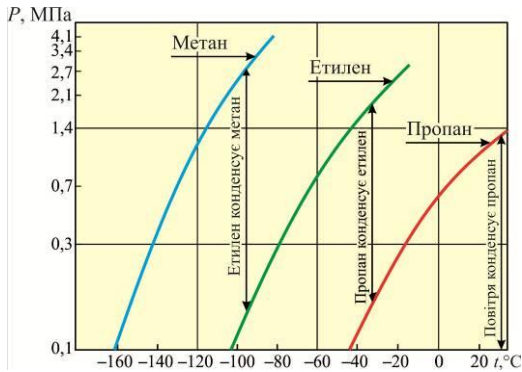


Рис. 3. Залежність тисків насичених парів метану, етилену та пропану від температури

За тих значення тиску, за якими працюють установки зрідження, кожному компоненту – метану, етилену і пропану відповідає певний діапазон температур у процесі охолодження природного газу та отримання ЗПГ. За певних термодинамічних умов пропан здатний сконденсувати етан або етилен. У свою чергу, етан або етичний здатні сконденсувати метан, і метан зможе сконденсувати потік природного газу. На такій схемі збудовано каскадні процеси зрідження природного газу.

Розглянемо простий каскадний процес отримання ЗПГ. Як чисті холодоагенти приймемо наступні гази: пропан, який має температуру кипіння -42°C , етилен, з температурою кипіння -104°C та і метан, температура кипіння якого -162°C . Якщо на криву охолодження газу накласти рівні охолодження трьох різних холодоагентів у трьох різних, простих циклах, отримаємо рис. 4, а.

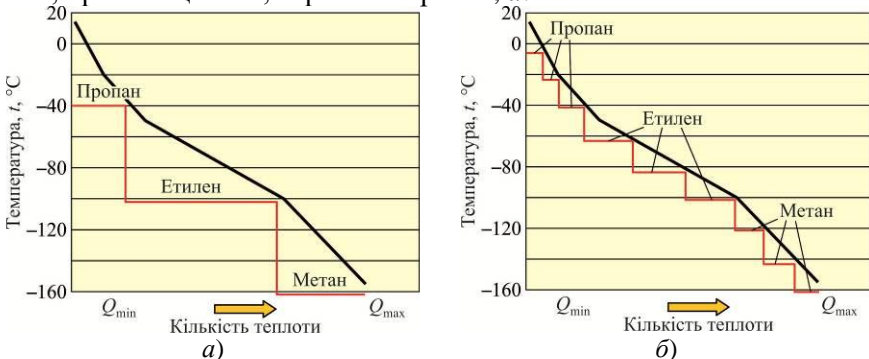


Рис. 4. Криві охолодження природного газу та чистих холодоагентів під час

використання одноступеневих (а) та триступеневих (б) циклів охолодження

Область діаграми між кривими охолодження відповідає втратам теплоти в циклах, тобто такий процес не є ефективним. Насправді, у такому вигляді три ступені охолодження на чистих холодоагентах використовувалися надзвичайно рідко. Для підвищення ефективності процесу кожен простий холодильний цикл був замінений на триступінчастий цикл з трьома різними температурними рівнями в кожному циклі (див. рис. 2, б). В результаті вийшла дев'ятиступінчаста каскадна система, яка лягла в основу деяких промислових процесів одержання ЗПГ. Зіставлення кривої охолодження природного газу та кривої охолодження холодоагентів такої дев'ятиступінчастої каскадної системи дозволяє здавати висновок про її більшу ефективність порівняно з каскадним процесом, який використовує одноступінчасті холодильні цикли. Приклад діаграми триступеневого циклу охолодження наведено на рис. 4, б.

З урахуванням того, що можна побудувати систему з трьома холодоагентами та з трьома окремими рівнями охолодження для кожного холодоагенту, то для подальшого підвищення ефективності процесу можна скомбінувати кілька компонентів в одну власну систему.

Внаслідок законів Бойля і Дальтона, під час змішуванні чистих компонентів парціальний тиск компонента газової суміші можна співвіднести з його точкою роси, тобто з температурою, за якою за заданому тиску починається його конденсація. Наприклад, суміш що складається з 33 % пропану, 33 % етану та 34 % метану знаходиться в замкнутому об'ємі під тиском 4,2 МПа. За законом Дальтона парціальний тиск кожного компонента суміші становить приблизно 1,4 МПа. За такого тиску пропан почне конденсуватися за температурою близько 41° С, етан – за –20° С, метан – за –116° С. Коли частина пропану сконденсується, мольний склад газу зміниться, іншими стануть і парціальний тиск компонентів суміші. Парціальний тиск пропану зменшиться, причому знизиться температура його конденсації, а парціальні тиски інших компонентів збільшаться, підвищивши температури їх конденсації. Це призводить до того, що крива охолодження змішаного холодоагенту стає гладкішою. Підбираючи склад суміші холодоагенту, можна максимально наблизити криву охолодження холодоагенту до кривої охолодження природного газу, тим самим роблячи процес зрідження газу ефективнішим.

До складу змішаного холодильного агента (ЗХА) можуть входити азот, пентан, бутан, пропан або пропілен, етан або етилен та метан. В зв'язку з тим, що температури кипіння у цих речовин різні: від 28°C у ізопентану до -196°C у азоту (табл. 4), під час охолодження компоненти газової суміші конденсуються по черзі.

Таблиця 4. Температури кипіння компонентів СХА за атмосферним тиском

Компонент	Температура кипіння, $^{\circ}\text{C}$	Компонент	Температура кипіння, $^{\circ}\text{C}$
Азот, N_2	$-195,8$	Пропан, C_3H_8	$-42,1$
Метан, CH_4	$-161,5$	I-бутан, C_4H_{10}	$-11,7$
Етилен, C_2H_4	$-103,7$	Н-бутан, C_4H_{10}	$-0,5$
Етан, C_2H_6	$-88,6$	I – пентан, C_5H_{12}	$-27,9$
Пропілен, C_3H_6	$-47,2$		

Принципова схема простого холодильного циклу зі змішаним холодоагентом наведено на рис. 5.

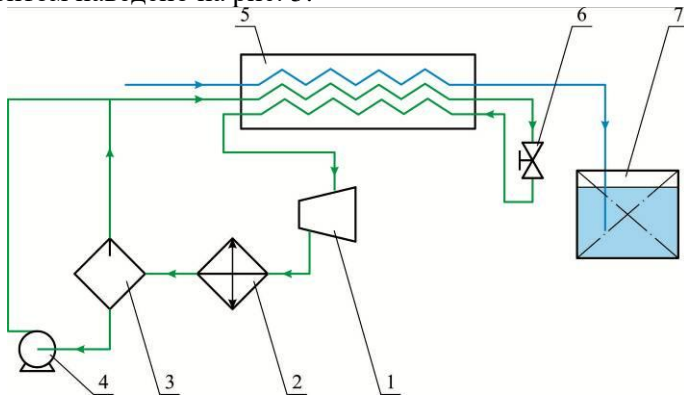


Рис. 5. Цикл охолодження зі змішаним холодоагентом:

1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – сепаратор; 4 – насос; 5 – багатопотоковий теплообмінник; 6 – дросель

До обладнання циклу на змішаному холодильному агенті (рис. 5) в порівнянні зі схемою простого пропанового циклу (рис. 2, а) входить такий самий компресор, холодильний агрегат, сепаратор, але до схеми включено трипоточковий теплообмінник зі збільшеною поверхнею теплообміну. Охолоджений і сконденсований потік змішаного холодоагенту, пройшовши в прямому напрямку теплообмінник, а потім дросель, під час проходження теплообмінника у зворотному напрямку використовується для охолодження самого себе і потоку природного газу (холодильне навантаження). На противагу чистим компо-

нентам конденсація змішаного холодоагенту не відбувається за якоїсь постійної температури. Замість декількох кожухотрубчастих випарників можна використовувати один потоковий теплообмінник зі збільшеною поверхнею теплообміну. Таким вимогам відповідають спіральновиті та ребристо-пластинчасті теплообмінники. Вони здатні одночасно пропускати кілька теплообмінних потоків.

Особливістю роботи багатопоточних теплообмінників під час зрідження природного газу є те, що частина теплообмінника працює у двофазній області. Отже, поліпшення теплообміну важливе значення має правильне розподіл потоків. Зокрема, в пластинчастих теплообмінниках потік, що випаровується, спрямовується знизу вгору, а потік, що конденсується – зверху вниз.

Холодильні цикли зі змішаними холодоагентами стали основою більшості сучасних технологічних процесів зрідження природного газу, які в тому числі використовуються на суднах-газовозах.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Зріджений природний газ є найбільш перспективним паливом, що в найближчий час буде використовуватися у всіх видах енергетики, в тому числі суднової.

Відносно морського транспорту ЗПГ має ряд переваг перед іншими паливами:

- більш висока екологічність – під час згоряння ЗПГ не виділяється парниковий газ, який негативно впливає на озоновий шарі Землі;
- нижча ціна, ніж на палива нафтового походження – переведення суднових енергетичних установок на використання ЗПГ дозволить суттєво підвищити економічні показники роботи морських суден;
- тривалий термін використання обладнання для ЗПГ, ніж під час використання палива нафтового походження, які можуть сильно зношувати деталі суднових теплових двигунів;
- скорочення шкідливих викидів в атмосферу, що є особливо актуальним з урахуванням постійного чи періодичного знаходження морських суден у спеціальних екологічних районах;
- можливість транспортування великих обсягів ЗПГ судами-газовозами на великі відстані.

Під час перевезення ЗПГ суднами-газовозами найбільш ефективною технологією його зрідження з економічної, енергетичної та еко-

логічної точок зору є використання циклів охолодження зі змішаним холодоагентом.

Перелік використаних джерел

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. Matieiko O. Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – № 4(1(78)). – Р. 43–50. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310699>.

3. Segin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

4. Budashko V., Shevchenko V. Solving a Task of Coordinated Control Over a Ship Automated Electric Power System under a Changing Load // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 2(2(110)). – Р. 54-70, 2021. doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

5. Segin 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: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – Р. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

6. Segin 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 and Technology. – 2022. – Vol. 69(1). – Р. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

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

8. Сагін С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морсько-го транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.07.

9. Будашко В.В., Онищенко О.А., Юшков Е.А. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса // Збі-

рник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 88-92.

10. Сагін С.В., Матейко О.В. Особливості інертизації вантажних танків суден-газовозів під час транспортування вогненебезпечних речовин // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36-49. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03.

11. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4(3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

12. 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. doi: 10.31653/smf47.2023.148-156.

13. Mrzljak V., Poljak I., Kosor M., Culin J. Bisection Method for the Heavy Fuel Oil Tank Filling Problem at a Liquefied Natural Gas Carrier // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 849. <https://doi.org/10.3390/jmse11040849>.

14. Manos A., Lyridis D., Prousalidis J., Sofras E. Investigating the Operation of an LNG Carrier as a Floating Power Generating Plant (FPGP) // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1749. <https://doi.org/10.3390/jmse11091749>.

15. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

16. Будашко В.В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 6. – С. 14-19.

17. 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. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

18. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Pıst'ek V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>

19. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», – С. 76-87.

20. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2020. – Вип. 2(59). – С. 88-98.

21. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.

22. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

23. 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). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

24. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2023. – № 118. – P. 195-206. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.

25. Budashko V.V., Yushkov Y.A. Mathematic modeling of allrange controllers speed of thrusters for ship power plants in combined propulsion complexes // Electronic Modeling. – 2015. – Vol. 37/ – № 2. – P. 101-114.

26. Chumak I., Zhyvytsya Y., Onishchenko O. Monitoring and energy saving control for reciprocating refrigerating compressors // Compressors-2006. – 2006. – Vol. 6. – P. 383-390.