

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 662.614.2.002.8:621.431.74

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.02>

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МОРСЬКИХ АМІАЧНИХ УТИЛІЗАЦІЙНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК

А.А. Андрєєв¹, В.І. Свиридов², Д.О. Шалапко³

¹к.т.н., професор, завідувач кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-1095-0398

²к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4841-7935

³к.т.н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

Анотація

Вступ. Одним із основних шляхів утилізації вторинних низькопотенційних теплових ресурсів суднових дизельних установок є застосування утилізаційних силових установок на низькокиплячих робочих тілах. Певною проблемою є вибір раціонального низькокиплячого робочого тіла, оскільки наявні суттєві негативні моменти у використанні традиційних робочих речовин. Наприклад, для хладонів характерні низька термічна стійкість, висока текучість, значна вартість тощо, а для вуглеводнів – горючість. **Мета.** Провести аналіз схем і характеристик різних аміачних силових установок для обґрунтування областей їх раціонального застосування в енергетиці, у тому числі й суднової. **Результати.** Розглянуто різноманітні аспекти застосування аміаку як робочого тіла. Аміак і до цього дня є основним робочим тілом, що розглядається в проєктованих і застосовується у створюваних океанських теплових електростанціях для районів як тропіків, так і Арктики. Результати розгляду в Національному університеті кораблебудування (м. Миколаїв) схем утилізації низькопотенційної теплоти суднових дизельних установок показують, що аміак знаходиться в групі робочих тіл, що забезпечують найвищі термодинамічні показники утилізаційних силових установок. Ще однією областю транспортного виконання аміачних утилізаційних силових установок є космічні сонячні енергетичні установки, призначені як електропостачання великих космічних станцій, так й у майбутньому передавання електричної енергії на Землю. Іншим перспективним напрямком утилізації низькопотенційних

вторинних теплових ресурсів є утилізаційні силові установки на водоаміачно-му розчині. Проведено порівняльний аналіз різних схем аміачних енергоустановок, їх термодинамічних і техніко-економічних характеристик. Завдяки своїм безперечним перевагам аміак є одним з основних перспективних робочих тіл утилізаційних силових установок. **Висновки.** Результати науково-дослідних робіт, дослідно-конструкторських розробок і промислової експлуатації підтверджують високу ефективність аміачних утилізаційних силових установок для широкого спектру застосування в енергетиці: від Світового океану до космосу.

Ключові слова: утилізаційна силова установка, тепла електростанція, низькокипляче робоче тіло, аміак, водоаміачна суміш.

PROSPECTS OF APPLICATION OF MARINE AMMONIA UTILIZATION POWER PLANTS

A.A. Andreiev¹, V.I. Sviridov², D.O. Shalako³

¹Ph.D (Engineering), Professor,
Head of the Ship Engineering and Power Engineering Department,
Kherson Educational and Scientific Institute of the National Shipbuilding University,
Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-1095-0398

²Ph.D (Engineering),
Associate Professor of the Ship Engineering and Power Engineering Department,
Kherson Educational and Scientific Institute of the National Shipbuilding University,
Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4841-7935

³Ph.D (Engineering),
Associate Professor of the Ship Engineering and Power Engineering Department,
Kherson Educational and Scientific Institute of the National Shipbuilding University,
Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

Summary

Introduction. One of the main ways of utilization of secondary low-energy thermal resources of marine diesel installations is the use of utilization power plants on low-boiling working fluids. A certain problem is the choice of a rational low-boiling working fluid since there are significant negative points in the use of traditional working fluids. For example, halon is characterized by low thermal resistance, high fluidity, significant cost, etc., while hydrocarbons are characterized by flammability. **Purpose.** To analyze schemes and characteristics of various ammonia power plants in order to substantiate the areas of their rational application in the energy industry, including shipbuilding. **Results.** Various aspects of the use of ammonia as a working fluid are considered. To this day ammonia is the main working fluid considered in the designing and constructing of ocean thermal power plants for both tropical and arctic regions. The results of the research on the schemes for the utilization of low-potential heat of ship diesel plants at the National Shipbuilding University (Mykolaiv) show that ammonia belongs to the group of working fluids that provide the highest thermodynamic indicators of utilization power plants. Another field of transport implementation of

ammonia utilization power plants is space solar energy plants, designed both for the power supply of large space stations and for the transfer of electrical energy to Earth in the future. One more promising direction of utilization of low-potential heat waste is water-ammonia mixture utilization power plants. A comparative analysis of various schemes of ammonia power plants, their thermodynamic, technical and economic characteristics was carried out. Ammonia is one of the most promising working fluids of utilization power plants due to its indisputable advantages. Conclusions. The results of scientific researches, design developments and industrial operations confirm the high efficiency of ammonia utilization power plants for a wide range of applications in the energy sector: from the ocean to space.

Key words: utilization power plant, thermal power plant, low-boiling working fluid, ammonia, water-ammonia mixture.

Вступ. Високі ціни на суднове паливо висувають на перший план задачу підвищення паливної економічності суднових дизельних установок (СДУ) шляхом утилізації її вторинних теплових ресурсів [1], зокрема, з метою вироблення електричної або механічної (для передавання на гребний гвинт чи для приводу інших механізмів) енергій. Однак, якщо технології використання в утилізаційних силових установках (УСУ) відхідних газів головних і допоміжних двигунів уже достатньо відпрацьовані, то низькопотенційна теплота системи охолодження суднових дизелів прісною водою застосування в УСУ не знаходить.

Постановка проблеми. Складність утилізації в суднових УСУ низькопотенційної теплоти викликана тим, що на такий рівень температур (до 100°C) традиційні установки, що реалізують конденсаційний цикл Ренкіна з водяною парою як робочим тілом, мають низку істотних недоліків [2]. Наявність вакууму в системі призводить, по-перше, до великих питомих об'ємів водяної пари, і, отже, до громіздких ступенів низького тиску турбіни та підвищених діаметрів трубопроводів, а, по-друге, до необхідності додаткових ежекторної та деаераційної установок. Значна вологість водяної пари в кінці процесу розширення знижує ККД силової турбіни та спричинює ерозійні руйнування її лопаток.

Ці недоліки можуть бути подолані при заміні водяної пари на низькокипляче робоче тіло (НРТ) [2, 3]. Крім відсутності вакууму в УСУ, менших габаритів та більш високих значень ККД турбомашин, перевагами НРТ є: можливість використання прямого котла-утилізатора (КУ), що спрощує УСУ; відсутність корозії елементів УСУ та ерозії лопаток турбіни; низька частота обертання турбіни. Якщо для водяної пари через вакуум температура конденсації підтримується не нижче 30°C, то для НРТ можливе зниження цієї температури (у холодну пору року; при плаванні у високих широтах), що збільшує корисну роботу циклу.

Певною проблемою є вибір раціонального НРТ, оскільки наявні суттєві негативні моменти у використанні традиційних робочих речовин УСУ. Наприклад, для хладонів характерні низька термічна стійкість, висока текучість, значна вартість тощо, а для вуглеводнів – горючість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективним альтернативним робочим агентом може вважатися аміак (NH_3), який екологічно (озоновий шар, парниковий ефект) безпечний, дешевий, має гарні як термодинамічні показники, так і характеристики теплопередачі. Застосування на судні аміаку як робочого тіла УСУ стає доцільнішим, якщо там встановлена аміачна рефрижераторна установка. При цьому можливе залучення ще одного джерела низькопотенційних теплових ресурсів, а саме теплоти перегріву парів аміаку після стиснення в компресорі (температура кінця процесу стиснення може досягати 160°C [4]). Крім того, зараз активно розглядають аміак як перспективне паливо суднових головних двигунів, яке дасть можливість досягти декарбонізації судноплавства, мінімізувати його шкідливий вплив на довкілля [5].

Формулювання цілей статті. На сьогоднішній день у науково-технічній літературі є лише розрізнені дані про конкретні розробки аміачних УСУ, схеми їх роботи, конструкції машин і апаратів, термодинамічні та техніко-економічні показники. Це й визначило мету цього дослідження: провести аналіз схем і характеристик різних аміачних УСУ для обґрунтування областей їх кращого застосування в енергетиці, у тому числі й судновій.

Виклад основного матеріалу. Питання застосування аміаку як НРТ УСУ морського виконання має давню історію. Ще у 1881 р. видатний фізик Жак-Арсен д'Арсонваль, теоретично обґрунтовуючи можливість використання в теплових електростанціях (ТЕС) величезних запасів теплової енергії Світового океану, запропонував застосувати аміак як робочу рідину океанських ТЕС (ОТЕС). Аміак і до цього дня є основним робочим тілом, що розглядається в проєктованих і застосовується у створюваних ОТЕС для районів як тропіків [6], так і Арктики [7, 8]. У тропічних ОТЕС використовується різниця температур поверхневих шарів океану, що мають у районах між 5°пд.ш. і 15°пн.ш. стійку температуру $27\text{...}28^\circ\text{C}$, і глибинних (на глибині 300 м температура води знижується до 12°C , а на глибині 700 м – до $4\text{...}6^\circ\text{C}$). Техніко-економічні характеристики деяких таких станцій, що працюють на аміаку, наведені в табл. 1 і табл. 2.

Принцип дії арктичної ОТЕС заснований на перетворенні в осінньо-зимовий період в УСУ різниці температур підлідної води арктичних морів ($+2\text{...}-2^\circ\text{C}$) та навколишнього повітря ($-25\text{...}-50^\circ\text{C}$). Уперше він був науково обґрунтований академіком О.Ф. Іоффе в 1932 р. Із 1980 р. цей напрямок активно опрацьовувався в Тихоокеанському океанологічному інституті Далекосхідного наукового центру АН СРСР спільно з Інститутом теплофізики Сибірського відділення АН СРСР і низкою наукових лабораторій Енергетичного інституту (ЕНІН), Московського енергетичного інституту (МЕІ), Одеського технологічного інституту холодительної промисловості (ОТІХП), Інституту високих температур АН СРСР (ІВТАН). Ними здійснювалися, зокрема, й дослідження ефективності застосування різних НРТ (табл. 3), які показали безсумнівну перевагу аміаку як робочого тіла даних УСУ [7].

Таблиця 1

Характеристики деяких дослідних аміачних тропічних ОТЕС

Характеристика станції	Найменування станції, розробник		
	міні-ОТЕС	ОТЕС-1	фірма «Mitsubishi», університет м. Сага (Японія), енергокомпанія «Kyushu Electric Power Co.»
Рік розробки, місце розташування	серпень 1979 р.; Гавайї (США)	середина 1980 р.; Гавайї (США)	вересень 1982 р.; о. Токуносіма (Японія)
Загальна генеруєма потужність, МВт	0,049 / 0,050*	1	0,05
Корисна потужність, МВт	0,012 / 0,0175*	немає даних	немає даних
Модульність установки	1	1	1
Котел-утилізатор	пластинчастий; площа теплообміну 38 м ² ; матеріал: титан	кожухотрубчастий; 6304 трубок; матеріал трубок: титан; діаметр 20 мм; довжина 18 м; маса заповнена 195 т	2 блока; пластинчасті; площа теплообміну по 102,6 м ² ; матеріал: титан
Конденсатор	пластинчастий; площа теплообміну 38 м ² ; матеріал: титан	кожухотрубчастий; 6304 трубок; матеріал трубок: титан; діаметр 20 мм; довжина 18 м; маса заповнена 105 т	площа теплообміну 383 м ² ; матеріал трубок: титан
Турбогенератор	немає даних	моделювався за допомогою дросельно-регулювального клапана	немає даних
Трубопровід холодної води	поліетилен; 58 секцій; внутрішній діаметр 0,5 / 0,6* м; довжина 700 м	поліетилен; пучок із 3 паралельних труб для кожної секції по 18 / 27* м; довжина 640 / 900* м; діаметр 1 / 1,219* м	твердий поліетилен; довжина 2350 м (глибина 370 м); діаметр 0,5 м
Витрати морської води, м ³ /с: холодної; теплої	0,165; 0,165	4,30; 5,25	0,126; 0,143
Корпус	баржа	переобладнений танкер проекту Т-2 «Cherachet» з паротурбоелектричним приводом	берегова
Водотоннажність, т	немає даних	5370	--
Спосіб закріплення у морі	за допомогою трубопроводу холодної води; для від'єднання труби від судна служить спеціальний затвор	немає даних	--

* – під рисою дані із різних джерел

Таблиця 2

Характеристики деяких проектів аміачних тропічних ОТЕС

Характеристика станції	Розробник				
	фірма «Lockheed»	фірма «ГРВ»	Японія	Франція	Франція
1	2	3	4	5	6
Загальна генеруєма потужність, МВт	240	125	3	15	3,5
Корисна потужність, МВт	160	100	2,1	немає даних	немає даних
Модульність установки	4	4	немає даних	2	1
Котел-утилізатор	4 блока; кожухотрубчасті; діаметр корпусу 22,2 м; 120000 трубок; матеріал трубок: титан; зовнішній діаметр 51 мм; довжина 16 м	4 блока; кожухотрубчасті; діаметр корпусу 15,2 м; 65400 трубок; матеріал трубок: титан; зовнішній діаметр 35 мм; довжина 13,1 м	пластинчастий; площа теплообміну 5847 м ² ; матеріал: титан; коефіцієнт теплопередачі 5724 Вт/(м ² ·К)	2 блока по 4 котла в кожному; діаметр корпусу 4,64 м; 91440 трубок; матеріал трубок: титан; діаметр 25 мм; товщина стінки 0,7 мм; довжина трубок 12,75 м; маса 145 т	2 котла; 22860 трубок; матеріал трубок: титан; діаметр 25 мм; товщина стінки 0,7 мм; довжина трубок 12,75 м
Конденсатор	4 блока; кожухотрубчасті; діаметр трубок: титан; зовнішній діаметр 51 мм; довжина 16 м	4 блока; кожухотрубчасті; діаметр 15,2 м; 75900 трубок; матеріал трубок: титан; зовнішній діаметр 38 мм; довжина 13,1 м	пластинчасті; площа теплообміну 6167 м ² ; матеріал: титан; коефіцієнт теплопередачі 4737 Вт/(м ² ·К)	2 блока по 3 конденсатори в кожному; 59500 трубок; матеріал трубок: титан; діаметр 25 мм; товщина стінки 0,7 мм; довжина трубок 17,5 м; маса 135 т	2 конденсатори; 14875 трубок; матеріал трубок: титан; діаметр 25 мм; товщина стінки 0,7 мм; довжина трубок 17,5 м; маса 102 т
Турбогенератор	8 блоків; діаметр 3,5 м; вісь вертикальна; дифузори попарно встановлені на конденсаторах; ККД 90 %	4 блока; діаметр 6,4 м; вісь вертикальна; дифузори встановлені на конденсаторах; ККД 90 %	немає даних	2 блока; габарити 4г	габарити 2,5г

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6
Трубопровід холодної води	попередньо напружений бетон; 5 телескопічних секцій; діаметр від 31,1 до 38,4 м; довжина 305 м	фіброскло, армоване пластиком; внутрішній діаметр 15,2 м; довжина 1200 м	довжина 1500 м; діаметр 2,5 м	довжина 2920 м; діаметр 5,4 м	довжина 2920 м; діаметр 3,0 м
Витрати морської води, м ³ /с: холодної; теплої	1800; 1370	370; 440	6,60; 8,54	3г	2г
Корпус	напівзанурювальна платформа циліндричного типу, розташована вертикально; діаметр 75 м; висота 100 м; головний корпус складається з 4 роздільних енергетичних модулів, розташованих на 30,5 м нижче рівня моря; матеріал: армований та попередньо напружений бетон	судно циліндричної форми; на поверхні діаметр 104 м; висота 52 м; осадка 32 м; матеріал: армований й попередньо напружений бетон	берегова	берегова	берегова
Водотоннажність, т	300000	213000	--	--	--
Спосіб закріплення у морі	якірна система, що складається з трапезії розширювача, бріделя, вертлюга, якірного троса й якоря	динамічна система утримання в точці функціонування	--	--	--
Термін служби, років	38...100	40	немає даних	немає даних	немає даних

Таблиця 3

Порівняльні характеристики арктичної ОТЕС потужністю 1 МВт при роботі на різних НРТ (мінімальна та максимальна температури циклу -24 і -6°С)

Робоче тіло	Масова витрата, кг/с		Потужність, кВт			ККД станції нетто, %
	робочого тіла	заборотної води	насосів		корисна станції	
			робочого тіла	заборотної води		
Хладон R12	124	2711	13	203	784	3,61
Хладон R13	179	2633	119	197	684	3,25
Хладон R22	93	2673	17	200	783	3,66
Пропан	52	2754	20	206	774	3,51
Аміак	16	2653	5	199	796	3,75

Серед цікавих розробок у цьому напрямку слід відзначити проект плавучої аміачної арктичної ОТЕС (рис. 1) для району острова Діксон (Єнісейська затока, $73^{\circ}30'$ пн.ш.), що передбачає розташування станції на борту переобладнаного крейсера «Михаїл Кутузов» проекту 68-бис (довжина 210 м, ширина 21,6 м, осадка 7,5 м, водотоннажність 19200 т, побудований на Чорноморському суднобудівному заводі у м. Миколаїв) [8].

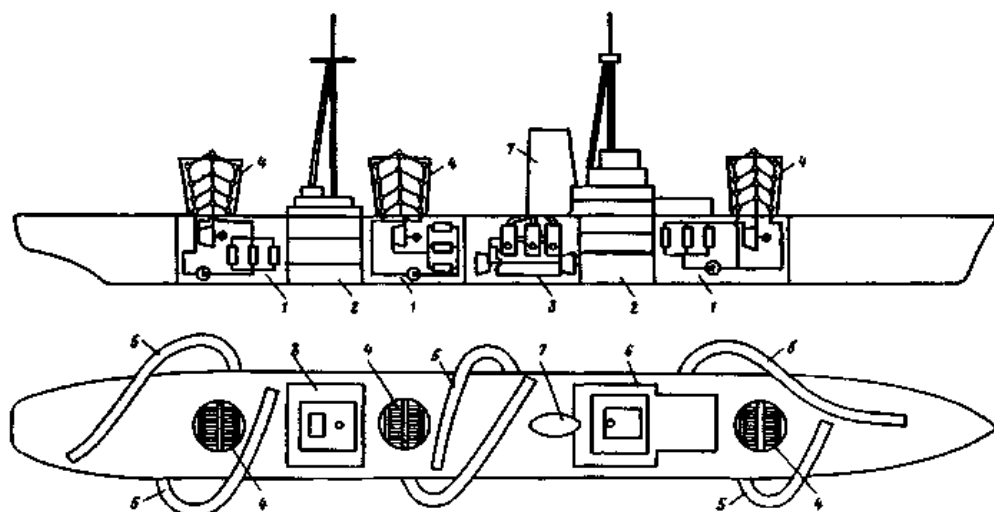


Рис. 1. Розташування арктичної океанської ТЕС на судні
1 – енергетичні модулі; 2 – житлові та допоміжні відсіки;
3 – машинне відділення із судновою силовою установкою;
4 – повітряні конденсатори-градирні; 5 – трубопроводи забирання та скидання заборотної води; 6 – носова палубна надбудова; 7 – димова труба машинного відділення; 8 – кормова надбудова

Перевагами суднового виконання ОТЕС є: монтаж обладнання на материковому суднобудівному або судноремонтному заводі й, тим самим, скорочення термінів введення в експлуатацію; можливість переміщення станції в літній період року на північ Таймирського півострова або Нової Землі й, отже, продовження сезонного часу використання. На судні передбачалося розмістити три енергомодулі одиничною потужністю по 40 кВт. У результаті розрахункових досліджень були отримані наступні оптимальні параметри базового модуля і основного технологічного обладнання: потужність модуля нетто 35,5 кВт; температури конденсації та кипіння аміаку $-14,0$ та $-2,6^{\circ}\text{C}$ відповідно; масова витрата аміаку 1,4 кг/с; теплоперепад на турбіні 58,3 кДж/кг; площа поверхні теплообміну КУ 364 м² (кількість ходів у секції 4, кількість трубок в одному ході 88, внутрішній та зовнішній діаметри трубок 12 та 14 мм, довжина трубок 2,5 м); витрата морської води через КУ 225,2 кг/с; площа поверхні теплообміну повітряного конденсатора-градирні 4677 м² (внутрішній та зовнішній діаметри трубок 16 і 20 мм, висота вежі 12,5 м; діаметр вежі 7,1 м); самотяга в градирні 0,22 Па; середня швидкість повітря в градирні 1,33 м/с; витрата повітря через градирню 708,2 кг/с [8].

Судновий напрямок реалізації УСУ знайшов відображення у дослідженнях, що проводяться нині в Національному університеті кораблебудування (м. Миколаїв). Результати розгляду схем утилізації низькопотенційної теплоти СДУ показують, що аміак знаходиться в групі НРТ, що забезпечують найвищі термодинамічні показники УСУ. Наприклад, була розрахована установка, що утилізує 1630 кВт теплоти високотемпературного контуру системи охолодження прісною водою судового головного середньооборотного дизеля марки 6L46-B фірми «Wartsila» (Фінляндія) потужністю 5850 кВт, при наступних вихідних даних: температури прісної води системи охолодження на виході та вході в КУ відповідно 74 і 91°C; температури кипіння та перегріву парів НРТ у КУ відповідно 70 і 80°C; температури заборотної води та конденсації НРТ відповідно 30 і 35°C. Були отримані такі характеристики роботи аміачної УСУ: тиск конденсації та кипіння аміаку 1358 і 3371 кПа; масова витрата аміаку 1,37 кг/с; потужності споживана насосом, корисна циклу і вироблена турбіною відповідно 8, 143 та 151 кВт; теплове навантаження на конденсатор 1487 кВт; термічний ККД установки 9,2 %.

Ще однією областю транспортного виконання УСУ є космічні сонячні ТЕС, призначені як електропостачання великих космічних станцій, так й у майбутньому передавання електричної енергії на Землю. Розглядаючи різні варіанти таких установок з турбогенераторними перетворювачами енергії, вчені найбільш детально пропрацювали систему, яка використовує як робоче тіло аміак [9]. Згідно проекту до складу одиничного енергомодуля вихідною потужністю 100 кВт (він може бути використаний як компоновочна одиниця космічної сонячної ТЕС будь-якої потужності) входять: складений параболоциліндричний концентратор сонячного випромінювання з холодильником-випромінювачем, розташованим з тильного боку; приймач випромінювання з додатковими концентраторами; нагрівач та перегрівач парів аміаку з тепловим акумулятором; паротурбінний перетворювач з регенератором; електрогенератор; система розкриття; система автоматичного регулювання. Така УСУ при нижній і верхній температурах циклу відповідно 100 і 600°C матиме ефективний ККД близько 30 %.

Іншим перспективним напрямком утилізації низькопотенційних вторинних теплових ресурсів є УСУ на водоаміачному розчині. До переваг водоаміачної суміші як робочого тіла УСУ відносяться [10, 11]: можливість шляхом зміни концентрації компонентів у НРТ створити єдину енергетичну установку для утилізації низькопотенційної теплоти в широкому інтервалі температур (100...200°C); доступність; екологічна безпека; термостійкість до 200°C; високі коефіцієнти теплопередачі теплообмінних апаратів; освоєність промисловістю. Уперше запропонував використати це робоче тіло у циклі теплового двигуна Л.М. Розенфельд у 1955 р. [12]; надалі О.І. Калина модифікував цикл шляхом введення системи розвиненої регенерації та запатентував із серпня 1982 р. понад 20 розроблених ним теплових схем (у публікаціях для подібних установок прийнято термін «цикли Калини»). Ним же була заснована компанія «Exergy», яка займається дослідженням, проектуванням і впровадженням утилізаційних технологій, що працюють на даному принципі. Із цією компанією уклали ліцензійні угоди такі відомі енергетичні фірми як «General Electric» (США), «Ausaldo Energia» (Італія), «Asea Brown Boveri (ABB)» (Швейцарія), «Ebara Corporation» (Японія), «X-Orka» (Ісландія).

Згодом японський фізик Х. Уехара у 1994 р. розробив більш досконалий цикл («цикл Уехари»). Із появою такої передової технології циклу можливості комерційного використання УСУ на водоаміачних розчинах стали більшими.

Промислові ТЕС на цій робочій суміші, що реалізують цикли Каліни та Уехари, експлуатують з 1999 р. в Японії на заводі фірми «Kashima Steel Works» (утилізація теплоти відпрацьованої води температурою 98°C) та з 2000 р. в Ісландії (геотермальні джерела з температурою 121°C); електрична потужність, що генерується, становить 3,1 та 2,0 МВт відповідно.

Найпростіша схема такої енергоустановки (рис. 2) містить підігрівач розчину (економайзер) 1, в якому водоаміачна суміш нагрівається до точки кипіння, і десорбер 2, де потім відбувається кипіння (спочатку при більш низькій температурі кипить аміак, а в міру зниження концентрації аміаку в розчині температура кипіння підвищується). Після сепаратора 3 пара, що утворилася, подається на турбіну 4, що є приводом електрогенератора 5. Слабкий розчин із сепаратора через дросельний клапан 6 надходить на змішання з відпрацьованою парою на вихлопі з турбіни. Далі після конденсації в абсорбері 7 міцний розчин живильним насосом 8 знову подається у підігрівач 1.

УСУ з водоаміачними НРТ підтвердили свої працездатність та ефективність як у рамках науково-дослідних робіт, так і при промисловій експлуатації (табл. 4), їх розгляду в іноземній технічній літературі останнім часом приділяється багато уваги.

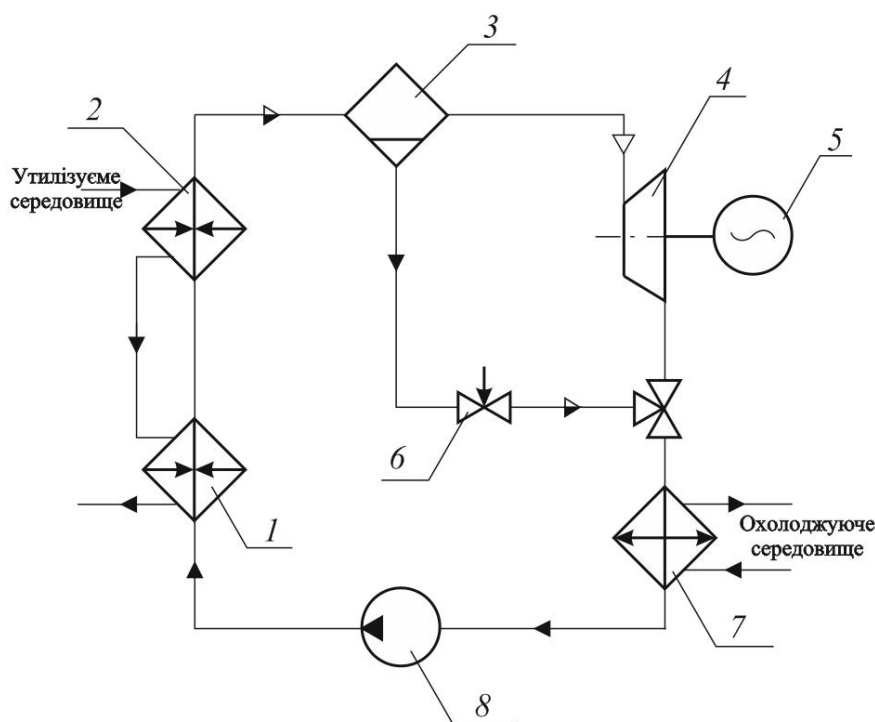


Рис. 2. Теплова схема утилізаційної силової установки з водоаміачним низькокиплячим робочим тілом

Таблиця 4

Характеристики УСУ на водоаміачному робочому тілі

Місце знаходження установки	Канога Парк, Каліфорнія (США)	Фукуока (Японія)	Токіо (Японія)	Хусавік (Ісландія)	Росія
Призначення	демонстраційне	демонстраційне	комерційне	комерційне	проект, 1996 г.
Організація, що займається експлуатацією	Конструкторський центр енерготехнологій при Міністерстві енергетики США	немає даних	«Kashima Steel Works», входить у «Sumitomo Metals Group»	муніципалітет м. Хусавіка	--
Проектувальник	«Exergy», Міністерство енергетики США	«Ebara Corporation»	«Ebara Corporation»	«Exergy», VGK	ЕНІН, ВО «Кіровський завод»
Введення в експлуатацію	1992 / 1996**	1999	1999	2000	--
Гріюче середовище	відхідні гази	теплота від сміттєспалувальної печі	прісна вода, що охолоджує відхідні гази від конверторів сталі	геотермальні води	геотермальні води
Температура гріючого середовища, °С	540 / 516**	немає даних	98	121	100...200
Електрична потужність, МВт	3 / 6**	2,6	3,10 / 3,30* / 3,45*	1,6 / 2,0*	4,01...5,10
Теплова ефективність, %	немає даних	немає даних	10,4	на 20 % більше традиційних	немає даних

* – під рисою дані із різних джерел;

** – після модернізації.

Висновки. Проведений аналіз схем, а також термодинамічних і техніко-економічних характеристик транспортних, у тому числі й суднових УСУ показує, що завдяки своїм безперечним перевагам аміак є одним з основних перспективних робочих тіл даних енергоустановок.

Результати науково-дослідних робіт, дослідно-конструкторських розробок і промислової експлуатації підтверджують високу ефективність аміачних УСУ для широкого спектру застосування в енергетиці: від Світового океану до космосу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Radchenko R., Kornienko V., Pyrysunko M., Bogdanov M., Andreev A. Enhancing the Efficiency of Marine Diesel Engine by Deep Waste Heat Recovery on the Base of Its Simulation Along the Route Line. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*. vol. 1113. Springer, Cham, 2020. Pp. 337-350. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_29
2. Radchenko A., Radchenko M., Mikielewicz D., Radchenko R., Andreev A. A novel degree-hour method for rational design loading. *Proceedings of*

- the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2023. Volume 237, Issue 3 (May). Pp. 570-579.
3. R.M. Radchenko, D. Mikielevich, M.I. Radchenko, V.S. Kornienko, A.A. Andreev, M.A. Pyrysunko Main engine of transport ship inlet air cooling by ejector chiller. Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering: Book of abstracts of the V International Scientific-Technical Conference, Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology, Poland, June 3-5, 2021. Kielce, 2021. Pp. 62–64.
 4. R. Radchenko, A. Radchenko, D. Konovalov, A. Zubarev, A. Hrych, A. Andreev Increasing fuel efficiency of gas engine by inlet air chilling. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Миколаїв, 24–25 вересня 2020 р., в 2 ч. – Ч. 1. – Миколаїв : НУК, 2020. – С. 569-580.
 5. Zhao Y., Setzler B.P., Wang J., Nash J., Wang T., Xu B., Yan Y. An Efficient Direct Ammonia Fuel Cell for Affordable Carbon-Neutral Transportation. *Joule*. 2019. vol. 3. № 10. Pp. 2472-2484. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.005>
 6. Ascari M.B., Hanson H.P., Rauchenstein L., Van Zwieten J., Desikan B., Heimiller D., Langle N., Scott G.N., Potemra J., Nagurny J.N., Jansen E. Ocean Thermal Extractable Energy Visualization. *Final Technical Report on Award DE-EE0002664*. October 28, 2012. United States: N. p., 2012. doi:10.2172/1055457
 7. А.А. Андреев, М.А. Пирисунько Зниження токсичності відпрацьованих газів судових дизелів. Сучасні проблеми холодильної техніки та технології: Збірник тез доповідей XII Всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Одеса, ОНАХТ, 27-28 вересня, 2019 р. Одеса, ОНАХТ, 2019. С. 14–16.
 8. R. Radchenko, A. Radchenko, D. Konovalov, A. Zubarev, A. Hrych, A. Andreev. Increasing fuel efficiency of gas engine by inlet air chilling. Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer: Monography of the Faculty of Mechanical Engineering University of Technology Koszalin. – 2019. – Volume 1, № 2 (10). – Pp. 641–662.
 9. D. Konovalov, M. Radchenko, H. Kobalava, A. Andreev, V. Maksymov Improvement of ejector refrigeration machine cycles by using thermopressor. Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer: Monography of the Faculty of Mechanical Engineering University of Technology Koszalin. 2019. Volume 1, № 2 (10). Pp. 301–326.

REFERENCES

1. Radchenko R., Kornienko V., Pyrysunko M., Bogdanov M., Andreev A. (2020). Enhancing the Efficiency of Marine Diesel Engine by Deep Waste Heat Recovery on the Base of Its Simulation Along the Route Line. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*. vol. 1113. Springer, Cham, Pp. 337-350. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_29

2. Radchenko A., Radchenko M., Mikielewicz D., Radchenko R, Andreev A. (2023). A novel degree-hour method for rational design loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. Volume 237, Issue 3 (May). Pp. 570-579.
3. R.M. Radchenko, D. Mikielevih, M.I. Radchenko, V.S. Kornienko, A.A. Andreev, M.A. Pyrysunko (2021). Main engine of transport ship inlet air cooling by ejector chiller / R.M. Radchenko, D. Mikielevih, M.I. Radchenko, V.S. Kornienko, A.A. Andreev, M.A. Pyrysunko // Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering: Book of abstracts of the V International Scientific-Technical Conference, Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology, Poland, June 3-5, 2021. Kielce, Pp. 62–64.
4. R. Radchenko, A. Radchenko, D. Konovalov, A. Zubarev, A. Hrych, A. Andreev (2020). Increasing fuel efficiency of gas engine by inlet air chilling. Innovations in shipbuilding and ocean engineering: Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference, Mykolaiv, September 24-25, 2020, in 2 hours - Part 1. Mykolaiv: NUK. P. 569-580.
5. Zhao Y., Setzler B.P., Wang J., Nash J., Wang T., Xu B., Yan Y. (2019). An Efficient Direct Ammonia Fuel Cell for Affordable Carbon-Neutral Transportation. *Joule*. vol. 3. № 10. Pp. 2472-2484. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.005>
6. Ascari M.B., Hanson H.P., Rauchenstein L., Van Zwieten J., Desikan B., Heimiller D., Langle N., Scott G.N., Potemra J., Nagurny J.N., Jansen E. (2012). Ocean Thermal Extractable Energy Visualization. *Final Technical Report on Award DE-EE0002664*. October 28, 2012. United States: N. p., doi:10.2172/1055457
7. Andreev A.A., Pyrysunko M.A. (2019). Reducing the toxicity of exhaust gases of ship diesels [Znyzhennya toksychnosti vidprats'ovanykh haziv sudnovykh dyzeliv]. Modern problems of refrigeration equipment and technology: Collection of abstracts of reports of the XII All-Ukrainian Scientific and Technical Conference, Odesa, ONAKHT, September 27-28, 2019 - Odesa, ONAKHT, pp. 14–16. [in Ukrainian]
8. R. Radchenko, A. Radchenko, D. Konovalov, A. Zubarev, A. Hrych, A. Andreev (2019). Increasing fuel efficiency of gas engine by inlet air chilling. Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer: Monography of the Faculty of Mechanical Engineering University of Technology Koszalin. Volume 1, № 2 (10). Pp. 641–662.
9. D. Konovalov, M. Radchenko, H. Kobalava, A. Andreev, V. Maksymov (2019). Improvement of ejector refrigeration machine cycles by using thermopressor. Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer: Monography of the Faculty of Mechanical Engineering University of Technology Koszalin. Volume 1, № 2 (10). Pp. 301–326.