

# ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-1-77-1>

УДК 629.128

Ліпенков І.В.

Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ВИХІДНИХ ГАЗІВ У СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

**Анотація.** Автором було проаналізовано сучасні системи очищення вихідних газів у суднових енергетичних установках. Особливу увагу приділено питанням забруднення навколишнього середовища та встановленню на суднах системи очищення вихлопних газів exhaust gas cleaning systems (EGCS), або, як їх ще називають, скрубери (scrubbers). В статті схематично описано основні забруднювачі атмосфери, які надходять з суден, тобто відпрацьовані гази головних і допоміжних двигунів (дизелів), димні котлоагрегати і інсинератори, а також газові викиди, які утворюються при роботі суднових систем, вентиляція приміщень судна і газоподібні витоку. Оцінюється стан існуючих способів і методів очищення вихлопних газів суднових енергетичних установок (головний двигун, дизель-генератор, суднові котли). В статті також висвітлюється перспективи дослідження цієї проблеми та рішення даної проблематики у зв'язку з сьогоденням. Аналіз матеріалів наукових досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених показали, що питання сучасних систем очищення вихідних газів у енергетичних установках на сьогодні остаточно не вирішено.

**Ключові слова:** суднова енергетична установка, паливо, очищення, двигун, скрубер.

Lipenkov Ihor

Danube Institute of the National University  
«Odessa Maritime Academy»

## ANALYSIS OF MODERN SYSTEMS OF SOURCE GASES PURIFICATION IN MARINE POWER PLANTS

**Summary.** Modern systems of purification of source gases in marine power plants has analyzed by the author. Particular attention has been paid to environmental pollution and the installation of exhaust gas cleaning systems (EGCS) on vessels, or as they are called, scrubbers. The article schematically describes the main air pollutants coming from vessels, namely the exhaust gases of the main and auxiliary engines (diesel engines), flue boilers and incinerators, as well as the gas emissions generated by the operation of ship systems, the ventilation of the premises and gas. The current state of existing methods and methods of cleaning the exhaust gases of ship power plants (main engine, diesel generator, ship boilers) is evaluated. The prospects for research into this problem and the solution to this problem in connection with the present are subjected at the article. Methods and systems for purifying gases and aerosols were also presented in the tables. The analysis of scientific researches showed that a sufficient number of scientists, in particular domestic, were engaged in the same problem. But the problem of modern systems of source gas purification and scrubbers is still poorly researched. The main aim of the article is to review the methods of cleaning the exhaust gases of ship power plants and to consider their positive and negative properties and qualities, possibilities and prospects for their installation on existing commercial vessels and recommendations for their use. The problem of environmental pollution is becoming more acute not only on land but also in the waters. Increasing economic cooperation is leading to the production of more and more capacious vessels: oil and gas tankers, container vessels, cargo vessels. The great majority of cargo ships use traditional diesel installations, and warships are often propelled by gas turbines powered by fuel oil. Thus, in the maritime transport world, the growing demand for the modernization of commercial fleets in the next 3-5 years is confirmed, as well as the fact that the shipowner is primarily interested not in alternative fuels, but in equipping existing ship systems with modern cleaning systems.

**Keywords:** ship power plant, fuel, cleaning, engine, scrubber.

**Постановка проблеми.** Суднова енергетична установка (СЕУ) – бортовий комплекс систем і агрегатів судна, що перетворює первинну енергію органічного (хімічного) або атомного палива в теплову енергію, з подальшим частковим перетворенням її в механічну енергію, потрібну для приведення в дію рушія судна і бортових механічних систем і пристроїв і в електричну енергію, яка споживається різними бортовими системами, пристроями і апаратурою.

До складу енергетичної установки входять [2]:  
– ГЕУ – головна енергетична установка (що приводить судно в рух і працює на власні потреби);

– допоміжні механізми – дизельні генератори, котли, компресори, опріснювальні установки.

Проблема забруднення навколишнього середовища стає все гостріше не тільки на суші, але і в акваторіях. Збільшення масштабів економічного співробітництва веде до виробництва все більш містких суден: нафтових і газових танкерів, контейнеровозів, суховантажних суден.

Переважає більшість вантажних суден використовує традиційні дизельні установки, а військові кораблі нерідко наводяться в рух газовими турбінами, які працюють на мазуті.

Удосконалення двигунів і енергетичних установок пов'язано зі зростанням їх економічності та надійності, а також зниженням їх маси і габаритів. Це досягається підвищенням початкових параметрів термодинамічних циклів, застосуванням регенерації та утилізації теплоти робочого тіла, нових матеріалів, видів палива і мастила [1].

Крім основних суднових енергетичних установок (СЕУ), другорядними енергетичними контурами і опалювальними системами оснащені практично всі судна. Лайнери, танкери, ролкери, ліхтеровози, балкери і контейнеровози обладнані додатковим обладнанням – нагрівачами котлами, викиди яких також потребують ретельного очищення.

Основними забруднювачами атмосфери (рис. 1), які надходять з суден, є відпрацьовані гази головних і допоміжних двигунів (дизелів), димні котлоагрегатів і інсинераторів, а також газові викиди, які утворюються при роботі суднових систем, вентиляція приміщень судна і газоподібні витоку [2; 3].

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз матеріалів наукових досліджень Брусельницького Ю.М., Хапаєва В.М., Скрипника В.М., Михайлюка В.О., Нунупарова С.М., Зубрилова С.П., Рєва Г.А., Решняка В.І., Седлухо Ю.П., Владецького О.В., Кузнецова В., Зубрилов С., Курников А., Маслов І., Венцель В. [1], а також порівняння переваг і недоліків різних способів і технічних засобів для очищення нафтовмісних вод СЕУ показали, що питання сучасних систем очищення вихідних газів у енергетичних установках на сьогодні остаточно не вирішено. Аналіз наукових досліджень показав, що тотальною проблематикою займалася достатня кількість вчених, зокрема вітчизняних: удосконаленням системи паливо підготовки суднових середньо обертових дизелів Солодовніков В.Г.; удосконаленням системи фільтрації газів на суднових дизельних установках Голубев М.В. та ін.; та зарубіжних вчених, таких як Agrawal H., Welch W.A., Miller J.W., A. McKinnon, Cooper D.A., E. Tzannatos.

**Мета даної статті** – розгляд існуючих способів і методів очищення вихлопних газів суднових енергетичних установок (головний двигун, дизель-генератор, суднові котли) і розгляд їх позитивних і негативних властивостей і якостей, можливості і перспективи їх установки на існуючих комерційних суднах і рекомендації по їх використанню.

**Виклад основного матеріалу.** Найбільша кількість димних газів СЕУ виділяється в атмосферу в процесі роботи головних і допоміжних парових або водогрійних котлоагрегатів. Димні гази інсинераторів відрізняються підвищеною токсичністю внаслідок складності і мінливості складу спалюваних відходів.

Зрозуміло, спалювання – і мазуту, і дизельного палива – пов'язане з високим рівнем забруднення повітряного і морського басейну руйнівними викидами, серед яких особливу небезпеку становлять оксиди сірки (SOx), оксиди азоту (NOx), альдегіди, безпірен, похідні антрацену, чадний газ і твердий пил – сажа. Всі вихлопи важчий за повітря рано чи пізно осідають на водну гладь і в значній мірі шкодять мешканцям моря і екології в цілому.

У відпрацьованих і димних газах СЕУ виявляється близько 200 компонентів [8]. За характером впливу на організм людини, хімічною структурою та властивостями вони діляться на сім основних груп:

- нетоксичні речовини – азот  $N_2$ , кисень  $O_2$ , водень  $H_2$ , водяна пара  $H_2O$ ;
- вуглекислий газ  $CO_2$ ;
- оксид вуглецю  $CO$ ;
- оксиди азоту  $NOx$ ;
- граничні і ненасичені вуглеводи  $C_nH_m$ ;
- альдегіди (формальдегід і акролеїн);
- сажа (характеризує димність);
- бенз(а)пірен.

До складу відпрацьованих газів при використанні сірчастого палива входять також сірчастий ангідрит  $SO_2$  і сірководень  $H_2S$ , що за певних умов утворюють сірчисту і сірчану кислоти. До най-

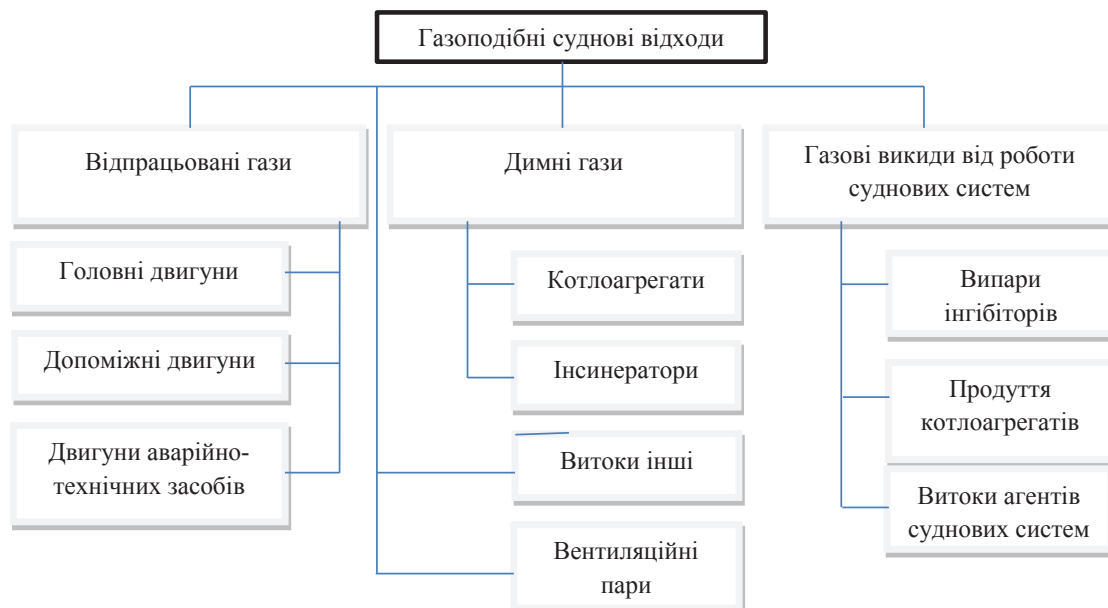


Рис. 1. Класифікація забруднювачів атмосфери з суден

Очищення газів і аерозолів									
Контактне			Термічне			Інерційне		Електричне	
Сорбція	Нейтралізація	Фільтрація	Пряме спалювання	Каталітичне спалювання	Окислювання	Сухе	Вологе	Полярзаційне	Коронно-розрядне
Адсорбція	Суха	Насадні фільтри		Реактори		Ротаційні уловлювачі	Турбулентні промивачі	Електро-статичні фільтри	Сухі електро-фільтри
Абсорбція	Волога	Тканинні фільтри		Окислювальні		Осадочні	Барботажні пилоуловлювачі		Вологі електро-фільтри
Хемосорбція	Комбінована			Відновлюючі		Вихрові	Гідрофільтри		
				Трьохкомпонентні			Скрубери		
							Циклопінні агрегати		

Рис. 2. Методи й засоби очищення газів і аерозолів

більш токсичних компонентів у відпрацьованих газів відносяться оксиди азоту та сажа. Небезпека останньої полягає в можливості переносити канцерогенні речовини типу бенз(а)пірену і ін.

У газоочисних пристроях (ГОП) з газів видаляються тверді сажисті частинки, шматочки окалини і інші ерозійно-небезпечні забруднення, які можуть пошкодити деталі проточної частини газової турбіни. Пройшовши очищення в ГОП, димові гази надходять в газу турбіну, розширюються, здійснюють корисну роботу, і через димхід віддаляються в димову трубу. Тверді частинки, відокремлені від основного потоку газу, по обвідному трубопроводу викидаються в димхід за газовою турбіною.

На рис. 2 наведені основні методи очищення газів і аерозолів, які розділені за кількома ознаками: принципом дії засобів очищення, конструкції, ступеня очищення і т.п.

До сучасних методів відносять обробку імпульсним коронним розрядом потоку газу при температурі до 100°C в зоні з високоактивними проміжними частинками.

В результаті відбувається утворення аерозолів або твердих продуктів, що уловлюються рукавними або електрофільтрами.

Однак необхідність охолодження відпрацьованих газів не дозволяє застосовувати метод в СЕУ.

Досліджується також окислення озоном ряду ненасичених і граничних вуглеводнів в газоповітряному середовищі і на поверхні каталізатора-сорбенту. Ефективне очищення відбувається при температурах не вище 70°C, що обмежує її застосування на флоті.

Всі електрофізичні методи очищення вимагають обов'язкового зниження температури газу і зменшення вологості, що перешкоджає їх впровадженню. Наявність специфічних вимог до суднових методів очищення, а також обмеження їх кількості призводять до того, що для практичного використання можуть бути рекомендовані: фільтрація, сорбція, нейтралізація і інерційні

рідинні апарати. Три останніх відносяться до «вологих» методів очищення, на судні для їх реалізації є необмежений обсяг робочого середовища – води. Вони відповідають судовим умовам з масо-габаритним показником, які працюють на перемінних режимах СЕУ, мають малий гідравлічний опір, відрізняються низьким енергоспоживанням, пожежобезпекою, а головне є те, що після очищення газів використану для обробки воду можна видаляти за борт. Особливо цікаві методи є нейтралізація рідинної плівкою і інерційний метод, здійснюваний в скруберах і циклопінних апаратах (ЦПА). Провівши порівняльний аналіз цих методів стосовно використання на суднах флоту, слід віддати перевагу інерційному, з наступних причин:

1. При хитавиці і вібрації може бути порушена цілісність плівки рідини і, тим самим, порушиться технологічний процес очищення газів.

2. Питома площа міжфазної поверхні (газ і вода) значно (на порядок) більше у другого методу.

3. Скрубер і ЦПА додатково виконують роль глушника.

4. «Вологий» інерційний метод дає більш високі результати по зниженню концентрацій шкідливих речовин в газі (табл. 1).

Таблиця 1

#### Ефективність очищення відпрацьованих газів СЕУ «вологими» методами

Шкідливі речовини	Зниження концентрації шкідливих речовин, %	
	Рідинної плівкою [18]	Скрубером [3]
Сажа	30	33
Оксиди азоту (NO <sub>x</sub> )	25	48
Оксид вуглецю (CO)	20	39
Оксиди сірки (SO <sub>2</sub> )	50	46

Станом на 31 травня 2018 року 983 судна в світі були оснащені установками очистки вихлопних газів (скруберами). Про це повідомляє Асоціація з очищення відпрацьованих газів (EGCSA) з посиланням на дані опитування членів асоціації.

Зацікавленість в установці скрубєрів підтверджує, що судновласники активно готуються до введення нових норм щодо вмісту сірки в судовому паливі. Починаючи з 1 січня 2020 року суднам буде заборонено використовувати паливо з вмістом сірки вище 0,5%. Тому до цього часу всі судна повинні будуть або перейти на альтернативні види палива, або пройти переобладнання з установкою скрубєрів.

EGCSA продовжує приймати заявки на переобладнання систем очищення вихлопних газів до 2023 року. На сьогоднішній день опитування EGCSA підтверджує, що 63% всіх суден в світі були або будуть модернізовані з використанням скрубєрів, а 37% нових суден будуть спочатку обладнані цими системами очищення. 988 з 1561 вже встановлених або замовлених скрубєрних систем призначені для очищення з відкритим контуром, що підтверджує популярність саме цього виду обладнання. Такі скрубєри простіше встановлювати і обслуговувати. Першими, хто випробував скрубєри для очищення вихлопних газів, ще в 2015 році стали власники ро-ро суден і поромів. За ними на нові системи переорієнтувалися власники круїзних суден. Тепер системи очищення вихлопних газів встановлюють на суднах, призначених для перевезення навалювальних вантажів, а також на контейнеровозах і танкерах. За даними EGCSA, в кожному з цих сегментів переважають модернізовані установки з відкритим контуром.

Для нейтралізації вихлопних газів в індустріальній і енергетичній промисловості, як правило, використовуються мокрі насадки (пінні, барботажні) і безнасадочні скрубєри (зрошувані циклони).

Морський судовий скрубєр, чие призначення полягає в ефективній нейтралізації вихлопних газів від дизельпалива або мазуту, в цілому, схожий з цивільними моделями пристроїв пилогазоочищення в базовому принципі дії.

Вихлоп «дизеля» або турбіни подається в скрубєрну колону, оснащену жалюзійними ярусами, на яких покладені насадки – тіла високою питомою площею. Для уповільнення потоку вихлопних газів в деяких випадках може використовуватися аеродинамічна труба, яка діє за зворотним принципом труби Вентурі. З метою первинного охолодження вихлопних газів в конструкцію може бути встановлений блок вприскування.

Блок розпилювальних форсунок зрошує внутрішню порожнину апарату або яруси з насадками, на поверхні яких створюється киплячий псевдозріджений (міжфазовий) шар, ефективно реагує з забруднювачами. Небажані газоподібні включення зв'язуються з абсорбентом, утворюючи «важкі» краплі шламу.

Утворений шлам під дією сили тяжіння опадає в шламоприймальник, а частина, що залишилася потоку додатково проходить через тумануловлювачі, після чого може бути як викинута в атмосферу, так і спрямована на інші потреби.

Для зниження загального гідродинамічного опору і більшої продуктивності скрубєри можуть бути об'єднані. Великі морські судна зазвичай використовують більше двох паралельно працюючих фільтраційних установок.

В таблицях 2, 3 приведені характеристики скрубєрів.

**Висновки і пропозиції.** Використання скрубєрів на суднах має більш сприятливі перспективи й економічно більш об'єднане чому використання альтернативних видів палива.

До 2020 р. багатьом судновласникам повинні будуть встановити на своїх суднах системи очищення вихлопних газів exhaust gas cleaning systems (EGCS), або, як їх ще називають, скрубєри (scrubbers), але статистика показує, що суд-

Таблиця 2

### Характеристики скрубєрів за типами контурів

Тип	Особливості	Рекомендації по використанню
Наскрізний тип	Використання морської води природної кислотності в якості буфера прямої подачі. Відсутність вимог по реагентам і прісній воді	Відкриті води з високою або помірною кислотністю
Закритий тип	Мінімальні вимоги щодо підготовки води. Буферизація із застосуванням абсорбентів	Водні басейни з низькою кислотністю: гирла річок, порти, озера, канали, бухти, континентальні водні артерії, а також зони заборони зливу рідкого баласту і води
Комбінований тип	Можливість роботи як в закритому, так і у відкритому режимі. Максимальна гнучкість обладнання	Універсальна система

Таблиця 3

### Характеристики скрубєрів за конфігурацією підведення газів

Одинарне підведення	Багатопотокове підведення газів
Одне джерело забруднення обробляється одним скрубєром	Кілька джерел забруднення обробляються однією скрубєрною системою
Низька вартість установки в рамках перекомплектації судна Мінімальне втручання в систему трубопроводів Оптимізація кожного апарату під окреме джерело забруднення Установка в умовах обмеженої висоти вихлопної труби	Раціональний там, де неможливо встановити кілька невеликих газоочисних установок в силу браку місця Зменшує необхідну кількість допоміжного обладнання в цілому Зменшує загальні витрати на пилогазоочисне оснащення



новласники поки що не квапляться із цим. Поки не настав 2020 р. можна попрацювати й на бункері з високим змістом сірки high sulphur fuel oil (HSFO) без очищення емісій, що дешевше, і це, насправді, є вагомий економічний аргумент. Частина суден міжнародного флоту почне використовувати СПГ у якості бункера, частина – малосірковий дистиллят. Однак у кожному разі від усіх судновласників це зажадає чимало інвестицій, але скрубери – це разова інвестиція, після якої можна й далі використовувати бункер з високим змістом сірки, тому що в емісіях зміст сірки не перевищить необхідного ліміту.

Отже, згідно із прогнозами ІМО в 2020 році, флот суден, обладнаних скруберами, буде нараховувати 3 800 од. із усього обсягу торговельного флоту (близько 60 000 од.), будуть мати встановлені системи «скрубери». Вони будуть спалювати 36 млн. т. HSFO у рік, і на цей різновид бункера буде доводитися 11% від сумарного попиту на морський бункер. Беручи до уваги виробничі потужності існуючих виробників «скрубери», у най-

ближчі кілька років очікується дефіцит готових «скрубери», що приведе до підвищення цін на низько-сірчисте паливо (LSFO) і, отже, до збільшення фінансових витрат відправників вантажу.

За прогнозами CE Delft, до 2020 р. 13% світового бункера будуть мати зміст сірки в 0,10% і менш, і це теж уже будуть дистилювати. Ще 76% бункера будуть містити сірку в межах від 0,10 до 0,50% залежно від того, що це за суміш і в якій пропорції змішані її інгредієнти. В умовах очікуваного дефіциту малосіркового фабричного дистилю, до того ж дорогого, саме цим розведеним бункером будуть задовольняти судна міжнародного торговельного флоту.

На сьогоднішній день у сфері світових морських перевезень підтверджується зростаючий запит на модернізацію суден комерційного флоту в перспективі найближчих 3-5 років, а так само те, що в данім питанні судновласника в першу чергу цікавлять не альтернативні види палива, а оснащення наявних суднових агрегатів сучасними системами очищення.

### Список літератури:

1. Венцель В.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / Химия. Москва, 1979. 320 с.
2. Кузнецов В.А. Судовые ядерные энергетические установки. Ленинград, 1989. 256 с.
3. Зубрилов С.П., Ищук Ю.Г., Косовский В.И. Охрана окружающей среды при эксплуатации судов. Ленинград, 1989. 256 с.

### References:

1. Ventsel, V.V. (1979). *Prymenenye smazochnykh masel v dvyhatelyakh vnutrenneho shoranyia* [The use of lubricating oils in internal combustion engines]. Chemistry. Moscow. (in Russian)
2. Kuznetsov, V.A. (1989). *Sudovye yadernye enerhetycheskye ustanovky* [Marine nuclear power plants]. Leningrad. (in Russian)
3. Zubrylov, S.P., Yshchuk, Yu.H., & Kosovskyi, V.Y. (1989). *Okhrana okruzhaiushchei sredy pry ekspluatatsyy sudov* [Environmental protection during the operation of ships]. Leningrad. (in Russian)