

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.3\(477\).3](https://doi.org/10.15589/znp2019.3(477).3)
УДК 62-911-026.743

**SUBSTANTIATION OF THE RATIONAL SEQUENCE OF PROCESSES
OF AEROSOL GRADIENT TECHNOLOGIES IN ELEMENTS
OF SHIP POWER PLANTS**

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
СПОСОБОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ГРАДИЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ЭЛЕМЕНТАХ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**ОБГРУНТУВАННЯ РАЦИОНАЛЬНОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ СПОСОБІВ
АЭРОЗОЛЬНИХ ГРАДІЄНТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕЛЕМЕНТАХ
СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

Anatolii P. Shevtsov
aootnet@ukr.net
ORCID 0000-0002-8692-6458
Georgii V. Kuznetsov
kuznetsov_georgiy@ukr.net
ORCID 0000-0002-1028-4102

А. П. Шевцов,
докт. техн. наук, профессор

Г. В. Кузнецов,
студент

А. П. Шевцов,
докт. техн. наук, профессор
Г. В. Кузнецов,
студент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The article offers the research results of the influence of the aerosol gradient technologies methods sequence and their operating parameters, which depend on the crossing time and the load of the power plant of the aircraft on their gas-purifying devices.

The goal of the research is to provide the necessary level of effective cleaning by combining different processes and ways of gradient transport of aerosols to ensure the specified technical and economic indicators of ship power plants. The main research's task is to justify the choice of the rational sequence of gradient methods aerosol technologies in the elements of ship power plants and to suggest ways of improving the purifying devices.

The object of the research are the treatment processes of aerosol in ship power plants and life support systems. Subject of the research – the characteristics of the sequences of processes of the aerosol media gradient transfer in boundary layers multifunctional surfaces and their performance fractional efficiency of purification in the ship power plants and life support systems.

Research method – the calculation-experimental method of determining individual performance fractional efficiency during the sequential events of given weight and size and operational factors of the gas-purifying devices.

As a result of the research on the basis of the separation efficiency complex indicator, which takes into account the purification efficiency, compact size the device and conditions of its operation justified a rational method of selecting a sequence of actions of thermal, acoustic and photophoretic effects and the surface tension gradient in aerosol technologies for purifying devices.

The practical significance of the results is to offer the directions for improvement of the ship power plant and life support systems with purifying devices.

Key words: suppression; fractional efficiency; particle; operational factors; multiphase flow.

Аннотация. В статье предлагаются результаты исследования влияния последовательности способов аэрозольных градиентных технологий и их режимных параметров, которые зависят от ходового времени и нагрузки энергетической установки судна на их газоочистительные устройства.

Целью исследования является обеспечение необходимого уровня эффективной очистки путем комбинирования различных процессов и способов градиентного переноса аэрозолей для обеспечения заданных технико-экономических показателей судовых энергетических установок.

Основная задача исследования – обосновать выбор рациональной последовательности способов аэрозольных градиентных технологий в элементах судовых энергетических установок и предложить пути совершенствования очистительных устройств.

Объектом исследования являются процессы очистки аэрозольных сред в судовых энергетических установках и системах жизнеобеспечения. Предмет исследования – характеристики последовательности процессов градиентного переноса аэрозольных сред в пограничных слоях многофункциональных поверхностей и их показатели фракционной эффективности очистки в судовых энергетических установках и системах жизнеобеспечения.

Метод исследования – расчетно-экспериментальный метод определения индивидуальных показателей фракционной эффективности при последовательном проведении событий с учетом массогабаритных и режимных показателей газоочистительных устройств.

В результате исследования на основе комплексного показателя эффективности сепарации, который учитывает эффективность очистки, компактность устройства и условия его эксплуатации, обоснован рациональный способ выбора последовательности действий термо-, акустико- и фотофоретических эффектов и сил поверхностного натяжения в аэрозольных градиентных технологиях для очистительных устройств.

Практическая значимость результатов заключается в предложении направлений совершенствования судовых энергоустановок и систем жизнеобеспечения с очистительными устройствами.

Ключевые слова: осаждение; фракционная эффективность; частица; эксплуатационные показатели; многофазный поток.

Анотація. У статті пропонуються результати дослідження впливу послідовності способів аерозольних градієнтних технологій і їх режимних параметрів, які залежать від ходового часу і навантаження енергетичної установки судна на їх газоочисні пристрої.

Метою дослідження є забезпечення необхідного рівня ефективного очищення шляхом комбінування різних процесів і способів градієнтного переносу аерозолів для забезпечення заданих техніко-економічних показників судових енергетичних установок.

Основне завдання дослідження – обґрунтувати вибір раціональної послідовності способів аерозольних градієнтних технологій в елементах судових енергетичних установок і запропонувати шляхи вдосконалення очистних пристроїв.

Об'єктом дослідження є процеси очищення аерозольних середовищ у судових енергетичних установках і системах життєзабезпечення. Предмет дослідження – характеристики послідовності процесів градієнтного перенесення аерозольних середовищ в приміжових шарах багатофункціональних поверхонь і їх показники фракційної ефективності очищення в судових енергетичних установках і системах життєзабезпечення.

Метод дослідження – розрахунково-експериментальний метод визначення індивідуальних показників фракційної ефективності за послідовного проведення подій з урахуванням масогабаритних і режимних показників газоочисних пристроїв.

В результаті дослідження на основі комплексного показника ефективності сепарації, який враховує ефективність очищення, компактність пристрою і умови його експлуатації, обґрунтовано раціональний спосіб вибору послідовності дій термо-, акустико- і фотофоретичних ефектів і сил поверхневого натягу в аерозольних градієнтних технологіях для очистних пристроїв.

Практичне значення одержаних результатів полягає в пропозиції напрямів вдосконалення судових энергоустановок і систем життєзабезпечення з очистними пристроями.

Ключові слова: осадження; фракційна ефективність; частинка; експлуатаційні показники; багатофазний потік.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Высокоэффективное очистное оборудование энергетических установок использует интенсивные технологии очистки в дисперсных многофазовых потоках. Совокупность гидродинамических, тепловых и массообменных процессов переноса аэрозолей является предметом исследования для данных технологий. Неоднородность физических полей обосновывает потенциальные возможности совершенствовать процессы очистки многофазных потоков в энергетических установках и повышать их технико-экономические показатели.

В настоящее время имеют место сепарационные технологии и устройства, которые способны делать очистку от частиц размером более 10 мкм с эффективностью не менее 0,99. Очистка газовых и жидких сред от частиц менее 10 мкм менее эффективна и требует применения нескольких последовательных способов сепарации за счет использования энергии рабочего тела.

Основной проблемой в процессе реализации вышеизложенного направления является выбор рациональной последовательности процессов сепарации для обеспечения необходимой степени отчистки от

аэрозолей в разных элементах судовых энергетических установок при ограничении их габаритов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Техническое совершенство сепарационных устройств характеризуется массогабаритными показателями, затратами энергии на перемещение рабочих сред, технологичностью [11].

Интенсификация процессов сепарации – один из эффективных способов снижения массы и габаритов, повышение экономичности, надежности работы этих устройств и энергетических установок в целом представлено в [14].

Значительное количество современных исследований высадки мелкодисперсной фазы базируется на анализе движения частиц диаметром 1 ... 10 мкм при различных термогидродинамических условиях на основах математического и физического моделирования [4; 12]. Градиенты температур, давления и концентраций можно использовать для достижения необходимой эффективности сепарации [15].

В исследованиях термогидродинамических процессов с турбулизацией многофазного потока [8; 10] обоснована эффективность использования пульсационных составляющих скорости и давления на процессы осаждения частиц на поверхностях. Однако закономерности влияния формы и последовательного расположения многофункциональных поверхностей на фракционную эффективность осаждения аэрозолей в пограничных слоях в приведенных исследованиях отсутствуют.

Создание обобщенных многоуровневых градиентных сепарационных аэрозольных технологий и их имплементация в инновационном ресурсосберегающем и экологическом оборудовании энергетических установок обеспечивается теоретико-экспериментальным решением исследовательских задач на единой методологической основе. В инновационных технологических схемах сепарации аэрозольных сред перспективно использовать следующее: инерционные силы для очистки от крупных частиц; турбофоретичных, турбодифузиофоретичных, неизотермических градиентов, акустических, фотофоретичных и инерционных сил для очистки от высокодисперсных частиц [5; 6].

На сегодня есть значительное количество работ по решению задач раздела фаз в многофазных потоках [1–3]. В этих работах достаточно подробно исследованы такие способы сепарации, как инерционный, турбо, дифузио- и неизотермическое градиентное осаждение, но отсутствует обоснование последовательности выбора вышеуказанных способов для улучшения технических характеристик аппаратов.

Научная проблема, на решение которой нацелена работа

Определение показателей эффективности отдельных способов очистки при их совокупном действии в элементах судовых энергетических установок с учетом их эксплуатационных показателей и рациональной их последовательности при организации технологии за счет различных форм движения, обмена энергией и массой с использованием внутренних энергоресурсов высокого и низкого потенциалов является научной проблемой создания новых поколений газоочистительных устройств для энергетических установок и систем жизнеобеспечения судов и кораблей.

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕ РЕШЕННЫХ РАНЕЕ ЧАСТЕЙ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

В изложенной выше проблеме исследования отсутствует обоснование выбора рациональной последовательности процессов сепарации для обеспечения необходимой степени отчистки от аэрозолей в разных элементах судовых энергетических установок при ограничении на массогабаритные показатели и длительности эксплуатации на отдельных режимах нагрузки. В то же время выбор рациональной последовательности требует определения достоверных закономерностей локального и совокупного влияния гидродинамических, тепловых и массообменных процессов на движение частиц многофазных потоков в пограничных слоях поверхностей энергетических установок и последующей апробации на конкретных их элементах.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является обеспечение необходимого уровня эффективной очистки путем комбинирования различных процессов и способов градиентного переноса аэрозолей для обеспечения заданных технико-экономических показателей судовых энергетических установок.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

1. Проанализировать процессы очистки аэрозольных сред, которые происходят в элементах энергетических установок, и определить для них индивидуальные фракционные эффективности.
2. Определить суммарную фракционную эффективность для последовательности процессов в конструкциях очистительных устройств и сопоставить расчетные значения эффективности с результатами экспериментальных исследований.
3. Обосновать выбор рациональной последовательности способов аэрозольных градиентных технологий в элементах судовых энергетических установок с учетом их компактности и ходового времени на различных нагрузках энергетической установки судов различных классов и предложить пути совершенствования очистительных устройств.

**ОБЪЕКТ, ПРЕДМЕТ И МЕТОД
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектом исследования являются процессы очистки аэрозольных сред в судовых энергетических установках и системах жизнеобеспечения. Предмет исследования – это характеристики последовательности процессов градиентного переноса аэрозольных сред в пограничных слоях многофункциональных поверхностей и их показатели фракционной эффективности очистки в судовых энергетических установках и системах жизнеобеспечения.

Метод исследования – расчетно-экспериментальный метод определения индивидуальных показателей фракционной эффективности при последовательном проведении событий с учетом массогабаритных и режимных показателей газоочистительных устройств.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ процессов, которые происходят в элементах энергетических установок, позволил определить совокупность процессов очистки и их эффективность. В основном они включают следующие совокупности процессов очистки: инерционный с пульсационным, инерционный с ультразвуковым, а также инерционный с ультразвуковым и неизотермическим.

При допущении, что осаждение частиц аэрозоля при разных процессах осуществляется независимо, суммарная фракционная эффективность осаждения на многофункциональной поверхности определяется выражением [20]:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - [(1 - \eta_i) \cdot (1 - \mu_n) \cdot (1 - \eta_y) \cdot (1 - \eta_n)]^m, \quad (1)$$

где η_i – вероятность осаждения частицы на элемент поверхности, соответствующим способом i , m – количество повторяемых процессов, определяемых количеством рядов сетки, индексы: Σ – суммарная, i – инерционная, μ – пульсационная, y – ультразвуковая, n – неизотермическая.

Для анализа показателей коэффициента эффективности рассчитаны значения вероятностей осаждения частицы на элементах поверхности для заданного способа, которые представлены на рисунках 1–6.

Полученные результаты характеризуются следующими диапазонами: размерами аэрозоля – 1 до 10 мкм, скоростью потока – 0,5 до 20 м/с, количеством рядов сетки – от 1 до 30. Показатели коэффициента эффективности получены для сеток номеров 05 и 025, частот колебания 100 Гц и частоты ультразвуковых колебаний 10 кГц.

Анализ результатов, представленных на рис. 1–4, определил, что зависимость инерционной составляющей для сеток номер 05 и 025 от скорости и диаметра частиц аэрозоля описывается полиномом 3 степени, а также при увеличении скорости и диаметра частиц инерционная составляющая растет. Коэффициент

осаждения увеличивается в 2,2 раза в диапазоне скоростей от 0,5 м/с до 4,8 м/с и в 1,58 раза в диапазоне скоростей от 4,8 м/с до 20 м/с, при увеличении числа рядов коэффициент осаждения возрастает в 1,9 раза. Пульсационная составляющая на рис. 1–4 описывается квадратической зависимостью и при увеличении скорости и диаметра частиц аэрозоля уменьшается. Коэффициент осаждения уменьшается в 1,24 раза в диапазоне скоростей от 0,5 м/с до 4,8 м/с и в 4,7 раза в диапазоне скоростей от 4,8 м/с до 20 м/с, при увеличении числа рядов коэффициент осаждения возрастает в 1,9 раза. С увеличением количества рядов сетки эффективность инерционного и пульсационного осаждения сравниваются при определенных значениях скорости потока, образовав две области, в которых в промежутке малых скоростей 0,5 – 4,7 м/с преобладает пульсационная составляющая, а в промежутке повышенных скоростей 4,7 – 20 м/с преобладает инерционная составляющая. Аналогично на рис. 5 эффективности инерционного и ультразвукового осаждения сравниваются и образуют аналогичные области.

Отдельные несоответствия коэффициентов осаждения первых рядов сетки для пятирядного, десятирядного и двадцатирядного расположения сетки может быть объяснено влиянием различных распределений частиц в пространстве при одной и той же концентрации аэрозоля перед поверхностью в рассматриваемых случаях.

Для сопоставления расчетных значений суммарной фракционной эффективности с результатами экспериментальных исследований в выше приведенные данные были введены результаты инерционных способов осаждения в соплах и криволинейных профилях конструкций очистительных устройств, которые представлены в таблице 1. Исходные данные для последних были приняты согласно результатам исследований [13] и [17–19], а суммарная фракционная эффективность в очистительных устройствах рассчитывалась по формуле:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_c) \cdot (1 - \eta_{к.п.}) \cdot [(1 - \eta_i) \cdot (1 - \eta_n) \cdot (1 - \eta_y) \cdot (1 - \eta_n)]^m, \quad (2)$$

где η_c – вероятность инерционного способа осаждения частицы в сопле, $\eta_{к.п.}$ – вероятность инерционного способа осаждения частицы в криволинейном профиле.

Поскольку исходные значения характеризуются диапазоном чисел от минимального до максимального значения, то результаты можно представить в виде диапазона между пессимистическим и оптимистическим значениями.

Выбор рациональной последовательности способов аэрозольных градиентных технологий в элементах судовых энергетических установок делается на основании комплекса показателей: суммарного коэффициента осаждения, габаритных показателей и распределения времени эксплуатации по нагрузке.

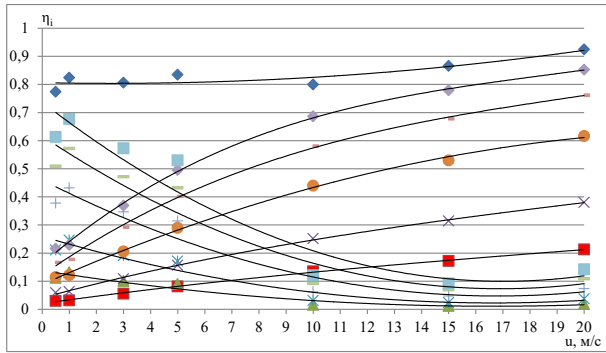


Рис. 1. Зависимости эффективности инерционного и пульсационного осаждения для сетки номер 05 от скорости потока: ■ – инерционное осаждение 1 ряда, × – 2 рядов; • – 4 рядов; – – 6 рядов; ◆ – 8 рядов. ▲ – пульсационное осаждение 1 ряда; * – 2 рядов; + – 4 рядов; – – 6 рядов; ■ – 8 рядов. ◆ – суммарная эффективность 10 рядов.

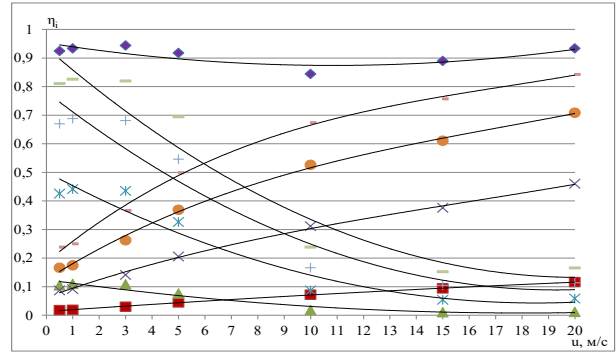


Рис. 2. Зависимости эффективности инерционного и пульсационного осаждения для сетки номер 05 от скорости потока: ■ – инерционное осаждение 1 ряда, × – 5 рядов; • – 10 рядов; – – 15 рядов. ▲ – пульсационное осаждение 1 ряда; * – 5 рядов; + – 10 рядов; – – 15 рядов. ◆ – суммарная эффективность 20 рядов.

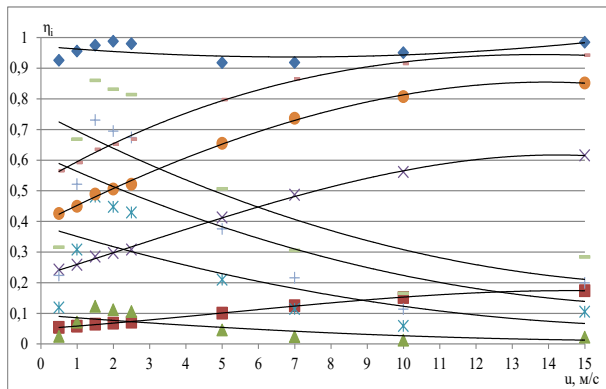


Рис. 3. Зависимости эффективности инерционного и пульсационного осаждения для сетки номер 025 от скорости потока: обозначения соответствуют рис. 2

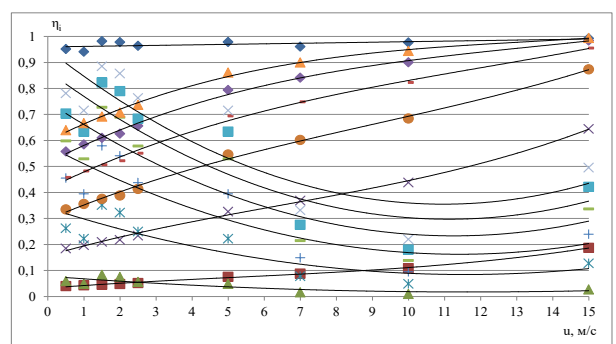


Рис. 4. Зависимости эффективности инерционного и пульсационного осаждения для сетки номер 025 от скорости потока: ■ – инерционное осаждение 1 ряда, × – 5 рядов; • – 10 рядов; – – 15 рядов, ◆ – 20 рядов, ▲ – 25 рядов. ▲ – пульсационное осаждение 1 ряда; * – 5 рядов; + – 10 рядов; – – 15 рядов, ■ – 20 рядов, × – 25 рядов. ◆ – суммарная эффективность 30 рядов

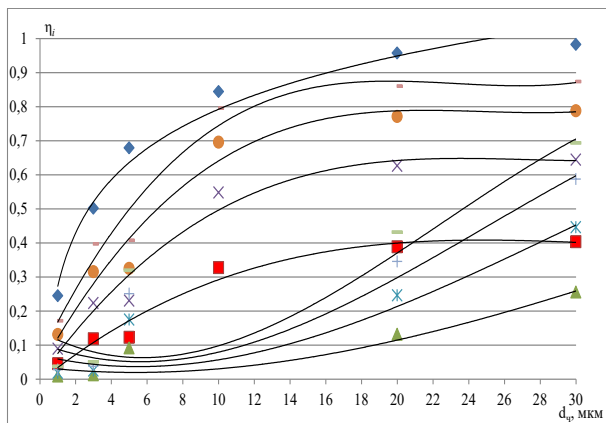


Рис. 5. Зависимости эффективности инерционного и ультразвукового осаждения для сетки номер 05 от диаметра частиц аэрозоля: ■ – инерционное осаждение 1 ряда, × – 2 рядов; • – 3 рядов; – – 4 рядов. ▲ – пульсационное осаждение 1 ряда; * – 2 рядов; + – 3 рядов; – – 4 рядов. ◆ – суммарная эффективность 5 рядов.

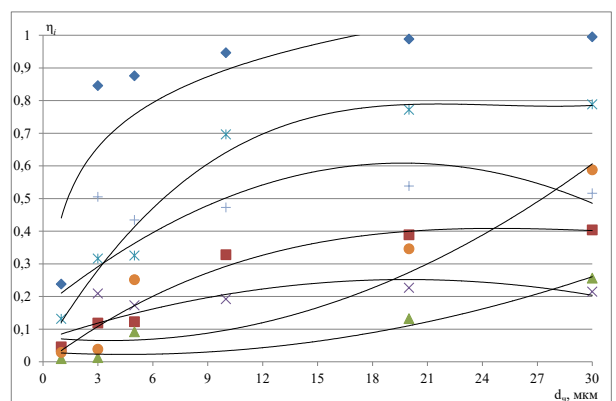


Рис. 6. Зависимости эффективности инерционного, ультразвукового и неизотермического осаждения для сетки номер 05 от диаметра частиц: ■ – инерционное осаждение 1 ряда; * – 3 ряда. ▲ – пульсационное осаждение 1 ряда; • – 3 ряда. × – неизотермическое осаждение 1 ряда, + – 3 ряда. ◆ – суммарная эффективность 5 рядов.

Таблица 1. Суммарный коэффициент осаждения для различных последовательностей процессов в очистительных устройствах

Сепаратор	Процессы	Расчетный суммарный коэффициент осаждения		Экспериментальный суммарный коэффициент осаждения
		Пессимистический	Оптимистический	
1. Акустикофоретический маслоотделитель систем суфлирования газотурбинных двигателей 4-го поколения ДН 80 и ДГ 90 с расходом газа до 200 м³/ч	Инерционное сопло и криволинейный профиль	0,990	0,999	–
	Инерционное сопло, криволинейный профиль, 5 рядов инерционной сетки $d = 0,5$ мм	0,994	0,999	0,999
	Инерционное сопло, криволинейный профиль, 10 рядов инерционной сетки $d = 0,5$ мм	0,996	0,999	0,999
	Инерционное сопло, криволинейный профиль, 30 рядов инерционной сетки $d = 0,5$ мм	0,999	0,999	–
	Инерционное сопло, криволинейный профиль, 1 ряд инерционной сетки $d = 0,5$ мм, пульсация	0,992	0,999	–
	Инерционное сопло, криволинейный профиль, 5 рядов инерционной сетки $d = 0,5$ мм, пульсация	0,996	0,999	0,999
	Инерционное сопло, криволинейный профиль, 10 рядов инерционной сетки $d = 0,5$ мм, пульсация	0,998	0,999	0,999
	Инерционное сопло, криволинейный профиль, 15 рядов инерционной сетки $d = 0,5$ мм, пульсация	0,999	0,999	–
2. Сепаратор сжатых газов энергосистем	Инерционное сопло, 1 ряд инерционной сетки $d = 0,5$ мм, 1 секция	0,903	0,990	0,999
	Инерционное сопло, 1 ряд инерционной сетки $d = 0,5$ мм, 2 секции	0,991	0,999	0,999
	Инерционное сопло, 1 ряд инерционной сетки $d = 0,5$ мм, 3 секции	0,999	0,999	0,999
3. Цилиндрические неизотермические градиентные сепараторы газа энергетических установок	Инерционная сетка 5 рядов $d = 0,5$ мм, неизотермический процесс, 1 секция	0,857	0,888	0,999
	Инерционная сетка 5 рядов $d = 0,5$ мм, неизотермический процесс, 2 секции	0,979	0,987	0,999
	Инерционная сетка 5 рядов $d = 0,5$ мм, неизотермический процесс, 3 секции	0,997	0,999	0,999
	Инерционная сетка 5 рядов $d = 0,5$ мм, неизотермический процесс, 4 секции	0,999	0,999	–

Для этого предложен комплексный показатель эффективности A_{Σ} , который учитывает эффективность, компактность, условия эксплуатации устройств сепаратора:

$$A_{\Sigma} = A_{\text{эф}} \cdot A_{\text{МГ}} = \eta \cdot \frac{\rho_{\text{среды}}}{\rho_{\text{мат}} \cdot \Pi} \cdot w \cdot \frac{\tau_{\text{раб}}}{l_{\text{сеп}}},$$

где $A_{\text{эф}}$ – показатель эффективности сепаратора, $A_{\text{МГ}} = A_{\text{расх}} \cdot A_{\text{Г}} = G_{\text{сред}} \cdot \frac{\tau_{\text{раб}}}{M_{\text{сепаратора}}}$ – его массогабаритный показатель,

$$G_{\text{среды}} = V_{\text{среды}} \cdot \rho_{\text{среды}} = S_{\text{сеч}} \cdot w \cdot \rho_{\text{среды}} \quad \text{– массовый}$$

расход среды, $C_{\text{сепаратора}}$ – масса сепаратора, $\tau_{\text{раб}}$ – время эксплуатации энергетической установки, $S_{\text{сеч}}$ – площадь входного сечения сепаратора, w – скорость среды в соответствии с мощностью энергетической установки, $\rho_{\text{среды}}$ – плотность среды, η – коэффициент осаждения, $l_{\text{сеп}}$ – длина сепаратора

Плотность сепаратора:

$$\rho_{\text{сепаратора}} = \frac{M_{\text{сепаратора}}}{V_{\text{сепаратора}}} = \frac{M_{\text{констр}} + M_{\text{среды}}}{V_{\Sigma \text{ констр}} + V_{\text{среды}}} \approx \rho_{\text{мат}} \cdot \Pi,$$

где $\rho_{\text{мат}}$ – плотность материала сепаратора, Π – показатель эффективности использования объема.

Для оценки эффективности применения градиентных технологий по сравнению с инерционным способом осаждения применен относительный показатель:

$$A_{\text{отн}} = \frac{A_{\text{град}}}{A_{\text{и}}} = \frac{\eta_{\text{град}}}{\eta_{\text{и}}} \cdot \frac{S_{\text{констр.и}}}{S_{\text{констр.град}}} \cdot \frac{l_{\text{констр.и}}}{l_{\text{констр.град}}} \cdot \frac{\rho_{\text{констр.и}}}{\rho_{\text{констр.град}}} \cdot \frac{w_{\text{средн.град}}}{w_{\text{средн.и}}} \cdot \frac{S_{\text{средн.град}}}{S_{\text{средн.и}}} \cdot \frac{\tau_{\text{град}}}{\tau_{\text{и}}},$$

где соотношения одноименных показателей различных способов характеризуют: $\frac{\eta_{\text{град}}}{\eta_{\text{и}}}$ – эффективность осаждения, $\frac{S_{\text{констр.и}}}{S_{\text{констр.град}}}$ – габаритные показатели,

$$\frac{w_{\text{средн.град}}}{w_{\text{средн.и}}} \cdot \frac{S_{\text{средн.град}}}{S_{\text{средн.и}}} – \text{нагрузку,}$$

$$\frac{\tau_{\text{град}}}{\tau_{\text{и}}} – \text{ресурс использования.}$$

Значения относительного показателя, по предварительным оценкам, должны быть не меньше 0,4.

Результаты расчетов для конструкций сепараторов, указанных в таблице 1, при одинаковых нагрузке и ресурсе использования, представлены в таблице 2, а для энергетических установок разных классов судов – в таблице 3.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из представленных результатов, применение градиентных технологий в совокупности с инерционными способами целесообразно для повышения эффективности осаждения в сепараторах и достижения общего уровня коэффициента осаждения более 0,99. Последовательное применение дополнительных пульсационного, ультразвукового и

Таблица 2. Относительный показатель эффективности сепараторов

Сепаратор	Исходные данные	$A_{\text{отн}}$
1. Акустикофоретический маслоотделитель систем суфлирования газотурбинных двигателей 4-го поколения ДН 80 и ДГ 90 с расходом газа до 200 м³/ч	$w_1 = 5$ м/с	0,9804
	$w_2 = 10$ м/с	1,041
2. Сепаратор сжатых газов энергосистем	$w_1 = 5$ м/с	1,023
	$w_2 = 1$ м/с	1,049
	$w_3 = 3$ м/с	1,066
	$w_4 = 5$ м/с	1,13
	$w_5 = 10$ м/с	1,0253
	$w_6 = 15$ м/с	1,377
	$w_7 = 20$ м/с	1,414
3. Цилиндрические неизотермические градиентные сепараторы газа энергетических установок	$w = 10$ м/с	
	$d_1 = 5$ м/с	0,436
	$d_2 = 5$ м/с	0,454
	$d_3 = 5$ м/с	0,479
	$d_4 = 5$ м/с	0,561
	$d_5 = 5$ м/с	0,625
	$d_6 = 5$ м/с	0,631

Таблица 3. Относительный показатель эффективности сепараторов для энергетических установок разных классов судов

Сепаратор	$\frac{\eta_i}{\eta_{\text{max}}}$	Танкер		Ледок.- транспорт. судно		Корабль		Ледокол	
		τ_{max}	A_{iopt}	τ_{max}	A_{iopt}	τ_{max}	A_{iopt}	τ_{max}	A_{iopt}
1. Акустикофоретический маслоотделитель систем суфлирования газотурбинных двигателей 4-го поколения ДН 80 и ДГ 90 с расходом газа до 200 м³/ч	1	0,775	0,849	0,376	0,53	0,364	0,171	0,212	0,295
	0,984		-		0,522		0,168		0,54
	0,973		0,785		0,987		0,511		0,298
	0,962		0,0285		0,216		0,093		0,606
	0,93		0,0237		-		-		0,343
2. Сепаратор сжатых газов энергосистем	1	0,775	0,849	0,376	0,529	0,364	0,171	0,212	0,2949
	0,993		0,801		-		-		0,293
	0,98		0,189		0,52		0,167		0,569
	0,96		0,0262		0,982		0,99		-
3. Цилиндрические неизотермические градиентные сепараторы газа энергетических установок	1	0,775	0,8489	0,376	0,53	0,364	0,170	0,212	0,295
	0,998		0,805		0,1089		-		0,614
	0,997		0,192		0,2267		-		-
	0,9964		0,0246		0,486		0,169		0,367

неизотермического осаждений способствует повышению эффективности осаждения в сепараторах и достижения общего уровня коэффициента осаждения до 0,999. С увеличением в многофункциональных поверхностях количества рядов сетки от 1 до 30 эффективность каждого из составляющих способов для последующего ряда сетки принималась постоянной, что обосновывалось отсутствием взаимного влияния способов при их реализации в устройствах с умеренной пористостью укладки рядов сетки. Снижение пористости, вызванное более плотной укладкой рядов сетки в многофункциональных поверхностях или применение сеток с меньшим размером ячейки, может привести к изменению эффективности каждого из составляющих способов для последующего ряда сетки. Это частично подтверждается результатами сравнения приведенных выше расчетных данных с экспериментальными и требует дополнительных исследований.

При эксплуатации в составе судовых энергетических установок влияние расхода и ресурса использования очистительных устройств учитывается зависимостями ходового времени по нагрузке энергетической установки, которая зависит от класса судна.

Выбор рациональной последовательности способов аэрозольных градиентных технологий на основании комплексного показателя, учитывающего эффективность, расход и ресурс использования очистительного устройства в составе судовой энергетической

установки, делается, как правило, сравнением габаритных показателей очистительного устройства для назначенного класса судна.

ВЫВОДЫ

Обоснована возможность последовательного применения в сепараторах совокупности инерционных способов осаждений с дополнительными пульсационным, ультразвуковым и неизотермическим для повышения эффективности осаждения частиц диаметром 1 ... 10 мкм при различных термогидродинамических условиях и достижения общего уровня коэффициента осаждения до 0,999.

Предложен комплексный показатель, учитывающий эффективность, расход и ресурс использования очистительного устройства в составе судовой энергетической установки, для выбора рациональной последовательности способов аэрозольных градиентных технологий, значение которой должно быть более 0,4.

Выбор рациональной последовательности процессов в многофункциональных поверхностях с умеренной пористостью укладки рядов сетки при реализации аэрозольных градиентных технологий в судовых энергетических установках и системах делается, как правило, сравнением габаритных показателей очистительного устройства для назначенного класса судна, что позволяет при выбранных габаритах очистительных устройств уменьшить экономические затраты на эксплуатацию установок.

REFERENCES

- [1] Abramovich, G. N. (1960). *Teoriya turbulentnykh struy* [Theory of turbulent flows]. Fizmatgiz. [in Russian]
- [2] Artemov, G. A. (1984). *Sovershenstvovaniye sudovykh gazoturbinykh ustanovok* [Improving marine gas turbine plants]. Sudostroyeniye. [in Russian]
- [3] Artemov, G. A., Gorbov, V. M., Romanovskiy, G. F. (1997). *Sudovyye ustanovki s gazoturbinnymi dvigatelyami* [Ship power plants with gas turbine engines]. Nikolayev : UGMTU. [in Russian]
- [4] Basok, B. I., Ryzhkov, S. S. (2003). Termoforeticheskaya oshistka vozdukhа v energeticheskom oborudovanii [Thermophoretic air purification in power equipment]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, № 5, 45–50. [in Russian]
- [5] Basok, B. I., Ryzhkov, S. S., Avramenko, A. A. (2006). Issledovaniye vliyaniya temperatury na protsess ulavlivaniya vysokodispersnykh chastits aerolya v gladkom kanale [Investigation of the temperature effect on the capture of highly dispersed aerosol particles in a smooth channel]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, № 3, 14–19. [in Russian]
- [6] Basok, B. I., Ryzhkov, S. S., Ryzhkov, R. S., Bortsov, O. S. (2014). Intensyfikatsiya osadzhennya ridkoyi fazy u separatorakh bahatofaznykh sumishey palyv pidvyshchenoho tysku. *Promyshlennaya teplotekhnika*, №1, 20–26. [in Ukrainian]
- [7] Baranovskiy, V. V. (2004). Obosnovaniye vybora glavnykh energeticheskikh ustanovok na stadii issledovatel'skogo proyektirovaniya korablye [Justification of the choice of the main power plants at the stage of research design of ships]. *Sudostroyeniye*, №3. [in Russian]
- [8] Venediktov, V. D. (1969). *Turbiny i reaktivnyye sopla na dvukhfaznykh potokakh* [Turbines and jet-pipe nozzles on two-phase flows]. Mashinostroyeniye. [in Russian]
- [9] Kurzon, A. G., Maslov, L. A. (1991). *Sudovyye turbinye ustanovki* [Ship turbine installations]. Leningrad: Sudostroyeniye. [in Russian]
- [10] Orlov, V. V. (1970). O poperechnom dvizhenii tverdykh chastits v potoke s pul'siruyushchim sdvigom [On the transverse motion of solid particles in a flow with a pulsating shear]. *Inzh.-fiz. zhurnal*, № 2, 341–344. [in Russian]
- [11] Ryzhkov, S. S., Pastukhov, S. U. (2010). Chislennoye modelirovaniye osazhdeniya vysokodispersnykh chastits v protochnoy chasti separatsionnogo oborudovaniya [Numerical simulation of the deposition of fine particles in the flow part of the separation equipment]. *Visnik NUK*, № 3. Retrieved from: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24952/22404>. [in Russian]
- [12] Ryzhkov, S. S. (2010). Issledovaniya gazodinamiki i teploperenosa turbulentnykh gazovykh sred s pomoshch'yu golograficheskoy interferometrii [Gas dynamics and heat transfer studies of turbulent gaseous media using holographic interferometry]. *Yelektronniy visnik NUK*, №4. [in Russian]

- [13] Ryzhkov, S. S. (2013) *Termoforeticheskiye separatory vozdukh dlya tekhnicheskikh pomeshcheniy* [Thermophoretic air separators for technical premises], Innovatsiyi v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi: Materialy IV Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi. Mykolayiv. [in Ukrainian]
- [14] Ryzhkov, S. S., Basok, B. I., Ryzhkov, R. S., Bortsov, O. S. (2014). Intensyfikatsiya osadzhennya ridskoyi fazy u separatorakh bahatofaznykh sumishey palyv pidvyshchenoho tysku [Intensification of liquid phase deposition in separators of multiphase mixtures of high pressure fuels]. *Promyslova teplotekhnika*, № 2, 22–28. [in Ukrainian]
- [15] Ryzhkov, S. S. (2014). Vliyaniye termoforeticheskikh effektov na protsess ulavlivaniya vysokodispersnykh chastits v trubchatom separatore [The effect of thermophoretic effects on the capture of finely dispersed particles in a tubular separator]. *Promyslova teplotekhnika*, №4, 88–94. [in Russian]
- [16] Ryzhkov, S. S. (2017). Rozrobka sudnovykh system ochyshchennya povitrya vid kraplynnoyi volohy [Development of ship systems for air purification from condensed moisture]. *Zbirnyk naukovykh prats' NUK*, №1. [in Russian]
- [17] Ryzhkov, S. S. (2017). Rozrobka separatoriv stysnutoho povitrya na osnovi tryvymirnogo modelyuvannya [Development of compressed air separators based on three-dimensional modeling]. *Zbirnyk naukovykh prats' NUK*, № 3. [in Ukrainian]
- [18] Ryzhkov, S. S. (2017). Employing the separation gradient aerosol technologies for designing the oil separators of venting systems in gas turbine engines ($G = 200 \text{ m}^3/\text{h}$). *Skhidno - Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, № 2, 59–66.
- [19] Ryzhkov, S. S. (2017). Primeneniye trekhmernogo modelirovaniya dlya gradiyentnykh aerol'nykh tekhnolohiy separatsii karternykh gazov DVS [The use of three-dimensional modeling for gradient aerosol technologies for the separation of crankcase gases of internal combustion engines.]. *Shipbuilding and marine infrastructure*, № 1(7), 151–163. [in Russian]
- [20] Shevtsov, A.P., Kuznetsov, H.V. (2019). Otsenka fraktsionnoy effektivnosti gradiyentnogo perenosa aerol'nykh v elementakh energeticheskikh ustanovok [Assessment of the fractional efficiency of gradient transfer of aerosols in elements of power plants]. *Zbirnyk naukovykh prats' NUK*, № 1. [in Russian]

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Абрамович, Г. Н. (1960). *Теория турбулентных струй*. Физматгиз.
- [2] Артемов, Г. А. (1984). *Совершенствование судовых газотурбинных установок*. Судостроение.
- [3] Артемов, Г. А., Горбов, В. М., Романовский, Г. Ф. (1997). *Судовые установки с газотурбинными двигателями*. Николаев : УГМТУ.
- [4] Басок, Б. И., Рыжков, С. С. (2003). Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании. *Промышленная теплотехника*, № 5, 45–50.
- [5] Басок, Б. И., Рыжков, С. С., Авраменко, А. А. (2006). Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале. *Промышленная теплотехника*, № 3, 14–19.
- [6] Басок, Б. И., Рыжков, С. С., Рыжков, Р. С., Борцов, О. С. (2014). Інтенсифікація осадження рідкої фази у сепараторах багатofазних сумішей палив підвищеного тиску. *Промышленная теплотехника*, №1, 20–26.
- [7] Барановский, В. В. (2004). Обоснование выбора главных энергетических установок на стадии исследовательского проектирования кораблей. *Судостроение*, №3.
- [8] Венедиктов, В. Д. (1969). *Турбины и реактивные сопла на двухфазных потоках*. Машиностроение.
- [9] Курзон, А.Г., Маслов, Л.А. (1991). *Судовые турбинные установки*. Ленинград : Судостроение.
- [10] Орлов, В. В. (1970). О поперечном движении твердых частиц в потоке с пульсирующим сдвигом. *Инж.-физ. журнал*, № 2, 341–344.
- [11] Рыжков, С. С., Пастухов, С. Ю. (2010). Численное моделирование осаждения высокодисперсных частиц в проточной части сепарационного оборудования. *Вісник НУК*, № 3. Взято с <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24952/22404>.
- [12] Рыжков, С. С. (2010). Исследования газодинамики и теплопереноса турбулентных газовых сред с помощью голографической интерферометрии. *Електронний вісник НУК*, №4.
- [13] Рыжков, С. С. (2013). *Термофоретические сепараторы воздуха для технических помещений*, Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв.
- [14] Рыжков, С. С., Басок, Б. И., Рыжков, Р. С., Борцов, О. С. (2014). Інтенсифікація осадження рідкої фази у сепараторах багатofазних сумішей палив підвищеного тиску. *Промышленная теплотехника*, № 2, 22–28.
- [15] Рыжков, С. С. (2014). Влияние термофоретических эффектов на процесс улавливания высокодисперсных частиц в трубчатом сепараторе. *Промышленная теплотехника*, №4, 88–94.
- [16] Рыжков, С. С. (2017). Розробка суднових систем очищення повітря від краплинної вологи. *Збірник наукових праць НУК*, №1
- [17] Рыжков, С. С. (2017). Розробка сепараторів стиснутого повітря на основі тривимірного моделювання. *Збірник наукових праць НУК*, № 3.
- [18] Рыжков, С. С. (2017). Employing the separation gradient aerosol technologies for designing the oil separators of venting systems in gas turbine engines ($G = 200 \text{ m}^3/\text{h}$). *Східноєвропейський журнал передових технологій*, № 2, 59–66.
- [19] Рыжков, С. С. (2017). Применение трехмерного моделирования для градиентных аэрозольных технологий сепарации картерных газов ДВС. *Shipbuilding and marine infrastructure*, № 1(7), 151–163.
- [20] Шевцов, А.П., Кузнецов, Г.В. (2019). Оценка фракционной эффективности градиентного переноса аэрозолей в элементах энергетических установок. *Збірник наукових праць НУК*, № 1.