

УДК 656.614.3
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/47>

Малахов О.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

Ніколаєва Л.Л.

Національний університет «Одеська морська академія»

Кіріс О.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

Бондаренко А.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

Козирєв І.П.

Національний університет «Одеська морська академія»

Палагін О.М.

Дунайський інститут Національного університету
«Одеська морська академія»

Найдьонов А.І.

Дунайський інститут Національного університету
«Одеська морська академія»

ВИКОРИСТАННЯ НА СУДНАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СЕПЕРАЦІЇ СУДНОВИХ ЛЯЛЬНИХ ВОД

Проблема сепарації суднових ляльних вод – суміші води з продуктами нафтохімії, що утворюється під час експлуатації суден водного транспорту є актуальною і потребує нових методів для свого вирішення. Для цього виконано аналіз основних особливостей кавітаційного методу сепарації, що ґрунтується на використанні принципу холодного кипіння потоку за рахунок низької величини його тиску в локально виділеній області робочої камери сепаратора. Показано, що кавітація може створюватися шляхом використання ультразвукових коливань і штучного вдування повітря, в потік, що рухається. На початковій стадії використання ультразвукового джерела хвиль зниженого тиску призведе до отримання першої стадії бульбашкової кавітації, а подальша вентиляція каверни дозволить вивести її на режим суперкавітації – суцільної парової каверни. В результаті досліджень показано, що при штучній вентиляції каверни при обробці суднових ляльних вод при переході на менші швидкості входу потоку води до сепаратора величина тиску пароутворення підвищується. Встановлено, що епюра тиску в перетині відбору водяної пари не повинна містити різких зламів свого контуру. У ході досліджень було виконано оцінку ступеня ефективності процесу сепарації суднових ляльних вод. Ефективність визначалася при трьох способах підтримки кавітації: гідродинамічному, ультразвуковому, ультразвуковому у комбінації зі штучною вентиляцією каверни за допомогою повітря. Спільний аналіз отриманих результатів дозволив виділити чисельні діапазони оптимальної робочої області експлуатації сепараційної установки. В цій зоні енергетичний ККД набуває своїх максимальних значень, об'ємний ККД практично не змінюється, а гідравлічний ККД змінюється в незначних межах. Отримані висновки про способи підвищення якості роботи суднового сепаратора ляльних вод.

Ключові слова: суднові ляльні води, сепарація, ультразвукова кавітація, водяна пара, діапазон експлуатації.

Постановка проблеми. Під час експлуатації суден водного транспорту нині виробилася чітка тенденція підвищення потужності суднових енергетичних установок з одночасним

зниженням енергетичних ресурсів, що витрачаються під час роботи судна. Використовуються різні схеми регенерації тепла, застосовуються нові конструкції суднових дизелів та

використовуються нетрадиційні джерела енергетичних ресурсів, до одного з яких можна віднести суднові лляльні води – суміш води з концентрованими продуктами нафтохімії.

Основна проблема всіх відомих технологій сепарації судових лляльних вод полягає у відсутності можливості збору та подальшої переробки висококонцентрованої суміші нафтопродуктів, що одержується на виході. Кінцевим продуктом є лише очищена вода. Вирішення цієї проблеми може кардинально вплинути на скорочення обсягів використовуваних природних ресурсів і підвищити якість контролю за станом екології та біосфери в планетарному масштабі.

На актуальність вирішення проблеми сепарації судових лляльних вод вказує низка міжнародних угод, програм та нормативних документів. До основного переліку таких документів належать: Конвенція з охорони та використання транскордонних водотоків та міжнародних озер, Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі, MARPOL 73/78 [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз основних особливостей кавітаційного методу сепарації судових лляльних вод показує, що він був розроблений відносно недавно і ґрунтується на використанні принципу холодного кипіння потоку за рахунок низької величини його тиску в локально виділеній області простору робочої камери установки сепарації.

Кавітаційний метод сепарації використовується для чисел кавітації, що не перевищують величину $\Omega=0.3$, а саме число кавітації визначається як

$$\Omega = \frac{P_{\infty} - P_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{V^2 - V_{\infty}^2}{V_{\infty}^2} \quad (1)$$

де V – швидкість потоку на межі кавітаційної каверни, м/с, V_{∞} – швидкість потоку на нескінченності, м/с.

Принцип роботи кавітаційного сепаратора судових лляльних вод базується на фазовому переході водної складової під впливом на оброблюваний багатозфазний потік кавітаційного поля в межах значень температури від 20 до 80 °С. Процес такого фазового переходу є регульованим, а сама кавітація може створюватися шляхом штучного вдування потоку газу, найчастіше повітря, в потік, що рухається. Такий процес характеризується підвищеними значеннями чисел кавітації ($0,18 < \Omega < 0,34$).

Кавітаційна каверна може створюватися не тільки за рахунок високої швидкості потоку, що обробляється, але і штучним шляхом – за рахунок вдування повітря або з використанням ультразвукових коливань. Виходячи із цих двох механізмів створення каверни, як видно на рисунку 1 при використанні режиму очищення судових лляльних вод із застосуванням штучної кавітації стінка входної розподільної пластини 1 може являти собою одночасно канал для подачі повітря на вентиляцію каверни або виступати в ролі складового елемента для ультразвукових генератора коливань 4.

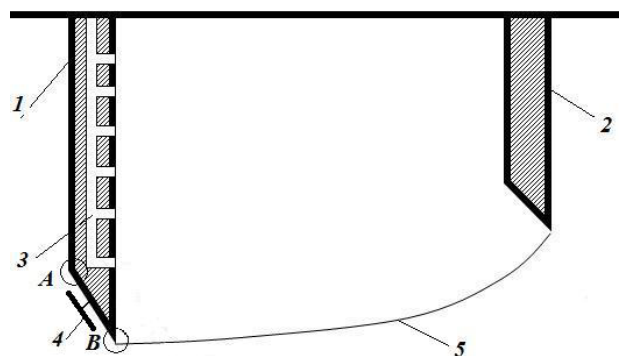


Рис. 1. Схема камери сепаратора
1, 2 – входна та вихідна пластини;
3 – канал для подачі повітря на вентиляцію каверни;
4 – генератор ультразвукових коливань;
5 – межа каверни

При створенні кавітації особливе значення має ступінь загостреності кромки входної пластини, яка впливає на градієнт зміни швидкості. Зрив потоку з гострої грані забезпечуватиме негативний профіль епюри швидкості, який згідно з матеріалами роботи [2] призводитиме до виникнення дрібномасштабних вихрових утворень. Такі дрібнодисперсні вихори можуть бути джерелами зародження ядер кавітації, а самі ядра кавітації будуть чітко локалізовані необхідної для процесу сепарації області робочого каналу.

Процес випаровування не є односпрямованим. При випаровуванні через межу кавітаційної каверни деякий об'єм частинок водяної пари буде повертатися назад у оброблюваний потік. Згідно з результатами роботи [2] кількість частинок, що повертаються при конденсації, знаходиться в прямій залежності від числа зіткнень молекул водяної пари в зоні випаровування і відповідно, від маси випареної речовини.

Постановка завдання. Всі існуючі технології сепарації судових лляльних вод призначені для очищення води від домішок і не дозволяють виконувати збір концентрованих

залишків нафтопродуктів на виході з сепаратора [3, 4] Єдиною альтернативою може виступати метод кавітаційної сепарації [2].

Через новизну методу багато питань його практичної реалізації залишаються, як і раніше, не дослідженими. В основному всі невирішені питання пов'язані зі створенням та підтримкою на стійкому рівні меж кавітаційної каверни при найменших витратах енергії, як на створення ультразвукового поля, так і на підтримку високих значень швидкості руху потоку, що обробляється. Додаткову складність додає відбір водяної насиченої пари, що сепарується, з каверни в силу чого її динамічна поведінка завжди характеризується нестационарним характером.

Як найбільш раціональне рішення в ході попередніх досліджень було розглянуто комбінований спосіб створення та керування межами кавітаційної каверни. На початковій стадії використання ультразвукового джерела хвиль зниженого тиску призведе до отримання першої стадії бульбашкової кавітації, а подальша вентиляція каверни дозволить вивести її на режим суперкавітації – суцільної парової каверни.

Головним завданнями досліджень в цьому випадку є оцінка ступеня ефективності процесу сепарації суднових льяльних вод для ультразвукової вентиляції і знаходження діапазону змін приватних ККД, що характеризують процес сепарації.

Виклад основного матеріалу. Відрив від генератора ультразвукових коливань потоку суднових льяльних вод з руйнуванням кавітаційної каверни незмінно призводитиме до пульсуючого характеру процесу сепарації. Усунення таких пульсацій можна досягти шляхом зменшення швидкості руху суднових льяльних вод або за рахунок штучної вентиляції каверни. У цьому випадку величина числа кавітації може бути зміщена в область вищих значень. Перевага штучної вентиляції каверни при обробці суднових льяльних вод наочно демонструється отриманим експериментальним шляхом графіком, представленим на рисунку 2. На ньому видно, що при переході на менші швидкості (зі зростанням числа кавітації) входу потоку води до сепаратора величина тиску пароутворення підвищується. Наведені експериментальні результати отримані для потоку води, що рухається в циліндричному трубопроводі при температурі нагріву 60 °С.

У ході сепарації суднових льяльних вод величина тиску всередині кавітаційної каверни завжди буде на порядок нижче величини зовнішнього тиску потоку на вході в робочу камеру сепараційної установки. З цієї причини величина мінімального коефіцієнта тиску C_p у вхідному перерізі робочої лінії з відбору водяної пари завжди буде негативною величиною. З цієї причини тиск у каверні перевищить тиск у лінії

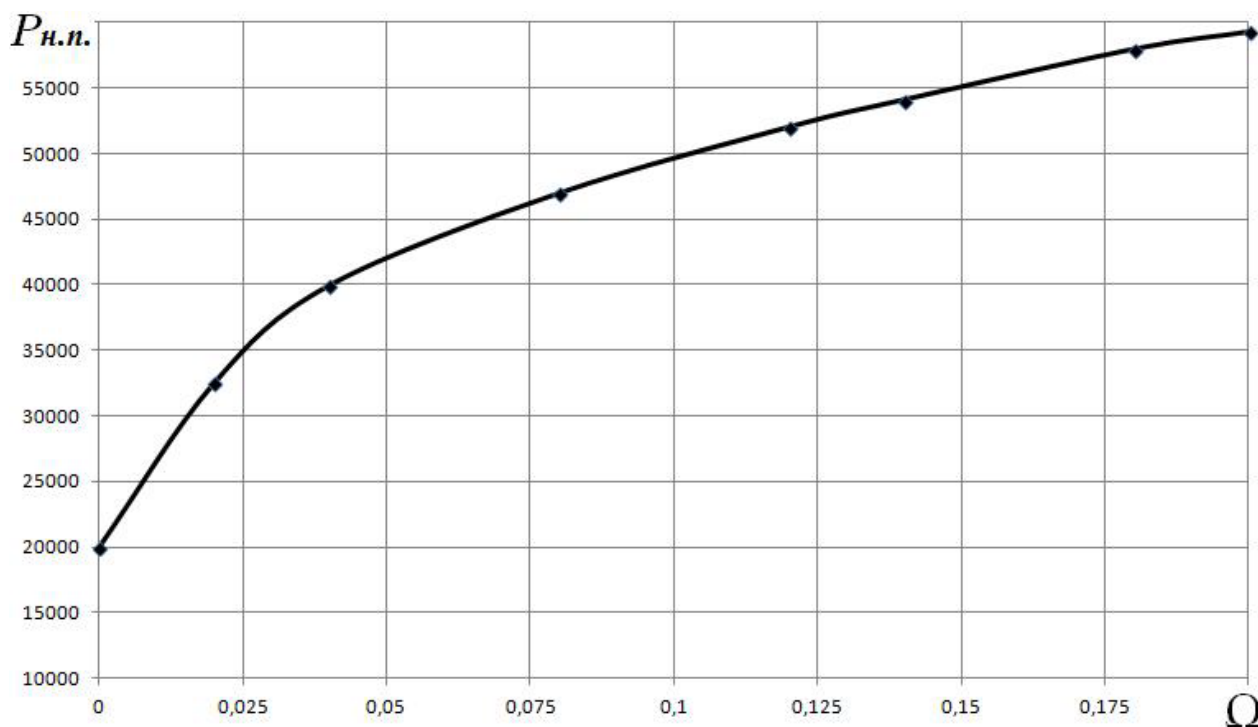


Рис. 2. Залежність тиску пароутворення від числа кавітації

відбору водяної пари тільки в тому випадку, коли виконуватиметься нерівність виду

$$|C_p| > \Omega \quad (2)$$

Аналіз виразу (2) дозволяє зробити висновок про те, що епора тиску в перетині відбору водяної пари не повинна містити різких зламів свого контуру. Тобто при відборі водяної пари незалежно від режиму роботи сепаратора необхідно забезпечувати гладкі і рівномірно розподілені епюри швидкості потоку, що відбирається. Технічно цю вимогу можна реалізувати шляхом використання різних соплових насадок у вхідних ділянках ліній відбору водяної пари.

Важливим питанням є обмеження на процес розгерметизації каналу для відведення водяної пари, що у процесі сепарації з суперкавітаційної каверни безупинно відбирається. При відборі з робочої камери сепаратора велике значення має швидкість відведення. Її максимальне значення відповідає критичній швидкості, яка для реальних умов експлуатації суднового сепаратора лляльних вод визначається як

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{2k_n}{k+1} g \frac{P_{max}}{\rho_{max}}} \quad (3)$$

k_n – показник адіабати водяної пари.

Значення, одержані по (3) в умовах експлуатації будуть меншими на величину швидкісного коефіцієнта ϕ , що відображає умови входу пари в трубопровід

$$V_{отв} = \phi V_{кр} \quad (4)$$

При відборі водяної пари з кавітаційної каверни через трубки, що розташовані на верхній поверхні робочої камери кавітатора виникає висока ймовірність прориву суміші повітря з водяною парою у зворотному напрямку від компресора усередину кавітаційної порожнини. Це може мати місце при некоректній роботі автоматично керованих клапанів. У цьому випадку буде повне руйнування кавітаційної каверни і зупинка процесу сепарації.

Умову зворотного прориву повітря можна висловити за аналогією з теоретичними дослідженнями роботи [2] через різницю тисків у лінії відбору водяної пари та кавітаційної суперкаверні.

Тиск усередині каверни, що кавітує можна записати як

$$P_k = P_0 - \Omega \frac{\rho V_0^2}{2} \quad (5)$$

P_0 – статичний тиск усередині каверни; V_0 – швидкість потоку на вході до робочої лінії для відбору пари.

Мінімальний тиск усередині робочої лінії відбору водяної пари має вигляд

$$P_{min} = P_0 + C_p \frac{\rho V_0^2}{2} \quad (6)$$

C_p – мінімальний коефіцієнт тиску у вхідному перерізі робочої лінії з відбору пари.

В остаточному вигляді відносна різниця тисків була записана у вигляді

$$\frac{P_k - P_{min}}{\frac{\rho V_0^2}{2}} = \dot{U} + C_p \quad (7)$$

Під час досліджень було знайдено залежність величини коефіцієнта опору C_x вхідної розподільної пластини в залежності від числа кавітації. Як показано на рисунку 3 це було виконано для двох обтічних конструкцій. Перший варіант відповідав окремо взятій пластині. Друга конструкція передбачала встановлення на вхідній розділовій пластині генератора ультразвукових коливань.

Характер зміни двох графіків є практично ідентичним – зростання числа кавітації призводило до збільшення коефіцієнта опору вхідної розподільної пластини. Відмінність у числових значеннях обумовлена характером руху потоку поблизу гострого краю пластини. Наявність генератора ультразвукових коливань призводила до підвищених значень локального поля тиску цієї частини робочої камери. Це відображалось в зростанні гідродинамічного опору насадка, що обтикається потоком.

У ході проведення досліджень було виконано оцінку ступеня ефективності процесу сепарації судових лляльних вод. Отримані дані відповідають однаковим часовим інтервалам при повністю ідентичних параметрах потоку, що обробляється на вході в робочу камеру кавітаційного каналу. Ефективність сепарації була оцінена за масовою витратою води, що була одержана після відділення і вона визначалася при трьох способах підтримки кавітації: гідродинамічному; ультразвуковому; ультразвуковому у комбінації зі штучною вентиляцією каверни за допомогою повітря.

На рисунку 4 показана зміна об'ємного, гідравлічного та енергетичного ККД для випадку штучної вентиляції каверни з використанням ультразвуку. Спільний аналіз наведених графіків дозволяє виділити оптимальну

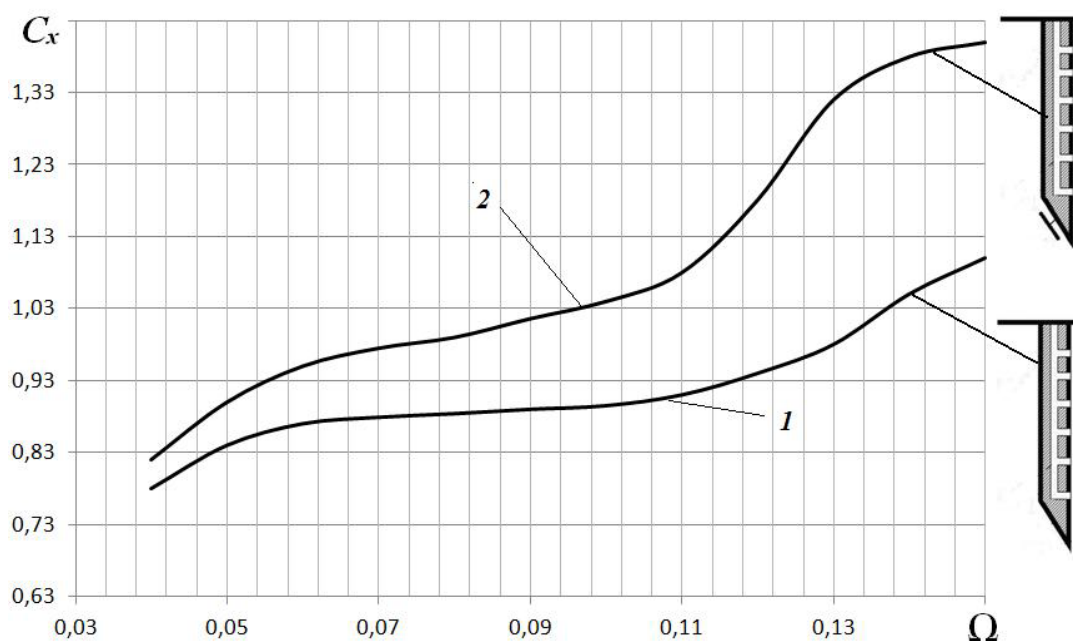


Рис. 3. Залежність коефіцієнта опору C_x вхідної розподільної пластини від числа кавітації потоку
1 – пластина без генератора ультразвукової кавітації; 2 – пластина з генератором ультразвукової кавітації

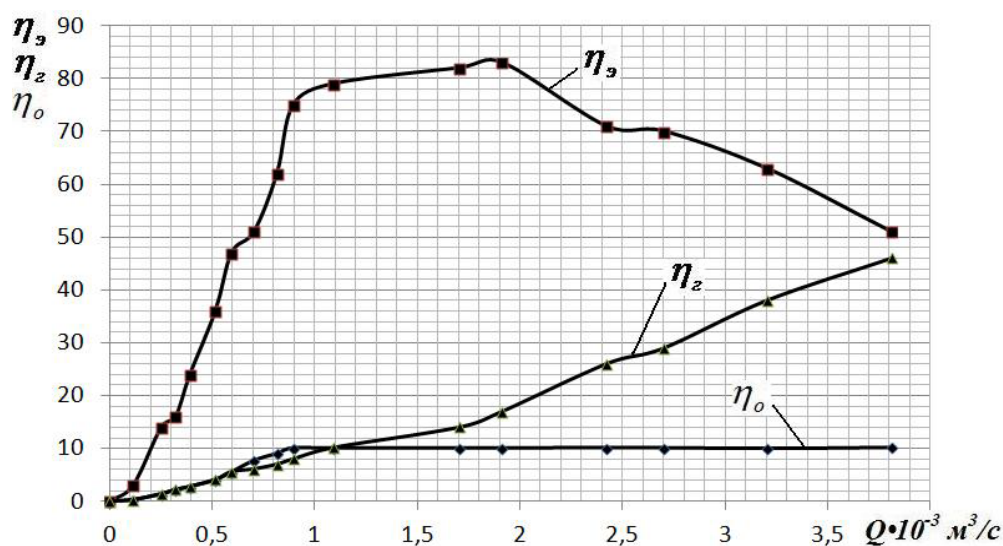


Рис. 4. Зведений графік приватних ККД сепаративної установки

робочу область експлуатації суднової сепаративної установки. Діапазон її меж за величиною об'ємної витрати наступний: початок робочої зони: $Q = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; закінчення робочої зони: $Q = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Саме в цій зоні енергетичний ККД набуває своїх максимальних значень ($\eta_e = 62\text{--}83\%$), об'ємний практично не змінюється ($\eta_o = 9,15\text{--}0,2\%$), а гідравлічний ККД змінюється в незначних межах ($\eta_r = 7\text{--}22\%$).

На підставі графіка можна зробити висновок про недоцільність зміни розмірів кавітаційного каналу у велику сторону. Збільшення величини

об'ємної витрати призводитиме лише до зменшення енергетичного ККД у бік менших значень. Тобто швидкість випаровування водної компоненти буде тільки зменшуватися. Також у цьому випадку можливе спостереження неадекватного збільшення гідравлічних втрат.

Більш правильним підходом підвищення якості роботи суднового сепаратора лляльних вод може бути касетний принцип компоновки робочих камер – кавітаторів.

Висновки. 1. Принцип роботи кавітаційного сепаратора суднових лляльних вод базується на фазовому переході водної складової під впливом

на оброблюваний багатофазний потік кавітаційного поля в межах значень температури від 20 до 70 °С. Процес фазового переходу є регульованим, а кавітація може створюватися не тільки за рахунок вдування повітря або з використанням ультразвукових коливань.

2. Для трьох способів підтримки суперкавітації виконано оцінку ступеня ефективності процесу сепарації суднових льяльних вод. З енергетичної точки зору технологією є комбіноване використання ультразвуку з вентиляцією каверни.

Список літератури:

1. MARPOL 73/78 – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; 1973:584. URL: <https://surl.li/neseys>
2. Malakhov OV, Palagin OM, Naydyonov AI, Lykhoglyad KA, Bondarenko AV. New technology for ship bilge and oily water separation. *Engineering Reports*. 2024; 6 (4):e12751. DOI: 10.1002/eng2.12751
3. Marine oil water separator market size & share analysis – growth trends & forecasts (2023–2028). URL: <https://surl.li/tktviz>
4. Buitendijk M. Bilge water separators – where are we now? SWZ Maritime; 2022. URL: <https://surl.li/dakzfx>

Malakhov O.V., Nikolaieva L.L., Kiris O.V., Bondarenko A.V., Kozyryev I.P., Palagin O.M., Naydyonov A.I. USE OF BILGE WATER ULTRASONIC SEPARATION ON VESSELS

The problem of ship bilge water separation – a mixture of water with petrochemical products formed during the operation of water transport vessels is relevant and requires new methods for its solution. For this purpose, an analysis of the main features of the cavitation separation method was performed, which is based on the use of the principle of cold boiling of the flow due to the low value of its pressure in a locally selected area of the separator's working chamber. It is shown that cavitation can be created by using ultrasonic vibrations and artificial air injection into a moving flow. At the initial stage, the use of an ultrasonic source of low-pressure waves will lead to the first stage of bubble cavitation, and further ventilation of the cavity will allow it to be brought to the supercavitation mode – a continuous steam cavity. As a result of the research, it was shown that with artificial ventilation of the cavity during the treatment of ship bilge water, when switching to lower speeds of the water flow entering the separator, the value of the vaporization pressure increases. It was established that the pressure diagram in the water vapor extraction section should not contain sharp breaks in its contour. During the research, an assessment of the efficiency degree of the ship's bilge water separation process was performed. The efficiency was determined with three methods of cavitation support: hydrodynamic, ultrasonic, ultrasonic in combination with artificial ventilation of the cavity using air. A joint analysis of the results obtained allowed to identify numerical ranges of the optimal operating area of the separation unit. In this zone, the energy efficiency reaches its maximum values, the volumetric efficiency practically does not change, and the hydraulic efficiency changes very slightly. Conclusions were formulated about ways to improve the quality of the ship's bilge water separator.

Key words: ship's bilge water; separation, ultrasonic cavitation, water vapor, operating range.