

10.31653/smf47.2023.69-81

Малахов О.В., Бондаренко А.В., Палагін О.М., Найденов А.І.,
Ліхогляд К.А.

Національний університет “Одеська морська академія”,
Дунайський інститут Національного університету “Одеська морська
академія”

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ СУДНОВИХ ЛЬЯЛЬНИХ ВОД

Вступ. Проблема виникнення, збору, зберігання та сепарації багатозфазного потоку води з нафтопродуктами, що позначається в умовах експлуатації засобів водного транспорту як суднові льяльні води (СЛВ) є дуже актуальною. При роботі суден СЛВ є найбільш багатотоннажним видом відходів і для їх обробки всі судна згідно з регламентуючими вимогами [1] повинні обладнуватися сепараторами СЛВ. Вихідна концентрація домішок в очищеній воді повинна становити менше 15 мл/л, а в ряді особливих районів планети скидання СЛВ за борт взагалі заборонено. При всебічному аналізі порушеної проблеми можна констатувати, що з економічної точки зору одержувані з СЛВ вторинні нафтові продукти становлять великий інтерес як джерело додаткових паливних ресурсів судна.

1. Загальна постановка проблеми.

Загальні джерела виникнення СЛВ. СЛВ є технологічними стоками, які в умовах роботи судна виникають у машинному відділенні, у вантажних трюмах, а також під час експлуатації палуби та палубних механізмів.

Згідно з виконаним аналізом роботи морських суден було встановлено, що основними генераторами компонентів, що складають основу СЛВ, які в кінцевому підсумку потрапляють у збірні льяльні колодязі та танки, є:

- конденсати від систем охолодження головного та допоміжного двигунів;
- конденсати від пускового та допоміжного компресорів подачі стисненого повітря;
- конденсати від системи палубних підігрівачів;
- дистилат від рефрижераторних установок та компресорних установок, що обслуговують системи кондиціонування;

- конденсат від систем підігріву нафтових танків (сепараторний танк, танк для інсінератора тощо);
- протікання трубопроводів та судових допоміжних механізмів, зокрема: забортної води, паливної, масляної та парової систем;
- відпрацьована вода з продуктами легкої хімії після збирання чи чищення розмивом палуб машинного відділення та піддонів судових допоміжних механізмів;
- продукти промивання або чищення розмивом, палуби, палубних механізмів, технологічної апаратури та допоміжного обладнання;
- проточна вода для особистої гігієни працівників машинного відділення великих багатотоннажних суден;
- відведення дощової води із судових димоходів у разі відсутності окремих ліній їх скидання;
- продукти миття вантажних трюмів або танків, що збираються в окремому, так званому SLOP-танці;
- продукти розливів нафтопродуктів при бункеруванні або при вантажно-розвантажувальних операціях, що збираються в окремому SLOP-танці;
- злив із носових, кормових та центральних судових колодязів та гатерсів.

Загальні особливості СЛВ. Якісний та кількісний склад СЛВ не є універсальним і є величиною змінною. До середньостатистичного переліку основних компонентів СЛВ можна віднести:

- розчинені гази;
- олії (індустріальні, відпрацьовані машинні тощо) з концентрацією до 1000 мг/л;
- відпрацьовані нафтопродукти та їх складові, а також нафтошлам (концентрація до 8000 мг/л);
- миючі речовини (концентрація до 5-10 мг/л);
- суспензії (концентрація до 300-500 мг/л);
- сульфати (концентрація до 200 мг/л);
- феноли (концентрація до 50 мг/л).

Всі перераховані вище компоненти, крім газів, характеризуються великим значенням питомої ваги в порівнянні з аналогічним параметром для води.

Якщо класифікувати компоненти СЛВ, як газоподібні, рідкі та тверді, то можна констатувати, що залежно від співвідношення між щільностями окремо аналізованої компоненти ρ_c та води ρ_w можливі наступні два варіанти поведінки суміші:

- у нерухомому стані з часом при $\rho_c < \rho_w$ за певний час при розширванні компоненти СЛВ спливатимуть вгору;

- при русі та $\rho_c > \rho_w$ компоненти СЛВ випадатимуть в осад.

Розглядаючи СЛВ як оброблюваний багатоконпонентний потік доцільно відзначити, що при аналізі практики експлуатації сепараційних установок було встановлено, що висока ефективність очищення має місце при концентрації шкідливих компонентів тільки до 100 мг/л [2]. Перевищення цієї величини призводить до ускладнення використовуваних методів сепарації.

Технології сепарування СЛВ. Загальні принципи функціонування технологічних схем, призначених для сепарації СЛВ безпосередньо визначаються робочими процесами, які застосовуються для розподілу їх складових компонентів. Принципово, в умовах експлуатації судна, можна виділити три основні напрямки очищення: фізичний, хімічний та біологічний. Найчастіше їх використовують у комбінації [3, 4].

В основі фізичного напрямку лежить використання масових та значно в менших обсягах поверхневих сил. До масових сил у разі відносять сили інерції, тяжкості, спливання тощо.

Реалізація хімічних процесів при сепарації СЛВ базується на використанні різних реагентів у комбінації з електрохімічним окисленням потоку, що оброблюється.

Біологічний напрямок сепарації СЛВ базується на використанні тих мікроорганізмів, що забезпечують у процесі своєї життєдіяльності знищення складових компонентів продуктів нафтохімії.

При роботі судів найбільшого поширення набули сепаратори, які працюють за принципом відцентрового розподілу потоку. Єдиним недоліком суднових відцентрових сепараторів є обмеженість їхньої продуктивності. Вони не можуть переробляти великі обсяги СЛВ за короткі проміжки часу. В основному подібне обмеження викликано довжиною шляху, який повинні долати частинки нафтовмісних домішок до потрапляння на вільну поверхню води або налипання на контактну поверхню сепаратора.

При сепарації СЛВ завжди використовується попередня фільтрація потоку, що обробляється. Вона базується на фізичному методі очищення і в її основі лежить використання напірної чи безнапірної фільтрації. Під час фільтрації використовують невідбирковий оборотний процес, що базується на використанні сил міжмолекулярної вза-

ємодії між молекулами фільтраційного матеріалу та молекулами компонентів СЛВ.

2. Постановка завдання. На підставі проведеного аналізу методів сепарування з урахуванням їх переваг та недоліків для подальшого проведення науково-дослідних робіт було обрано напрямок, пов'язаний з використанням штучної кавітації. До головної проблеми, що має місце при використанні гідромеханічних характеристик потоку для його сепарування можливо віднести відсутність даних, що описують залежність параметрів штучної каверни від характеристик потоку на вході до камери сепарування. Таким чином в якості головного завдання досліджень було обрано питання встановлення загальних залежностей процесу сепарування від параметрів потоку та методів утворення штучної кавітації.

3. Аналіз досліджень та публікацій щодо використання штучної кавітації для процесу сепарування СЛВ. Перевагою технології сепарації потоку СЛВ з використанням процесу суперкавітації зі штучною вентиляцією каверни є можливість очищення потоку з високою концентрацією шкідливих домішок. Такий метод може бути альтернативою електрохімічним методам сепарації, які в даний час вважаються практично єдиними ефективними методами, які можна застосовувати при загальній концентрації домішок у воді, що перевищує 1 г/л [5].

У силу складності процесів, що протікають при штучній кавітації, в даний час не існує чітко сформульованої теорії, що описує зв'язок між основними характеристиками такого перебігу і гідродинамічними силами, що впливають на просторові розміри каверни. Також не відомі дані, які вказують як витрата та тиск повітря, що подається на вентиляцію каверни, впливають на ці величини [6].

Просторова поведінка кавітаційних каверн безпосередньо визначається геометрією течії, у якій вони формуються. Форма каверни може суттєво змінюватися під впливом близько розташованих гідродинамічних особливостей. При цьому, залежно від їхньої інтенсивності та розташування щодо кавітаційної порожнини, можливо отримувати різний ступінь деформації її меж. При цьому, у разі дуже високих відносних швидкостей руху потоку вплив сил тяжкості рідини на геометрію каверни практично відсутній.

Наявність жорстких стінок поблизу каверни може призводити до виникнення асиметрії її меж щодо горизонтального перерізу. За наявності горизонтальної стінки каналу максимальна довжина кавіта-

ційної суперкаверни залежить від числа кавітації. Якщо каверна виникає за диском, то її довжина може бути описана співвідношенням виду

$$L_{max} = \frac{1,66d}{\Omega_{min}}, \quad (1)$$

d – діаметр диска, м; Ω_{min} – мінімальне число кавітації.

Величина мінімальної відстані h між стінкою та межами каверни при якій не буде спостерігатися її руйнування добре описується залежністю

$$h = \frac{0,375}{Fr_d^{4/3}}, \quad (2)$$

Fr – число Фруда.

Для наближеної оцінки часу τ , за який кавітаційна суперкаверна сферичної форми с радіусом r буде повністю заповнена водяною насиченою парою можна знайти за формулою

$$\tau = \frac{r}{3\alpha} \left(\frac{2\pi M}{Rt} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

При розширенні каверни тиск пари всередині її обсягу не завжди відповідатиме тиску насиченої пари. Для задоволення їх рівності необхідно, щоб виконувалось

$$t_s > \frac{r_{max}}{3\alpha} \left(\frac{2\pi M}{Rt} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

де t_p – час виходу каверни на стаціонарний стан.

Оцінка виразу (4) показує, що при температурі СЛВ, що дорівнює $20^{\circ}C$, тиск водяної пари всередині каверни дорівнюватиме тиску насичених пар при дотриманні наступної нерівності

$$\frac{r_{max}}{t_s} \leq 17,8 \text{ m/sec}. \quad (5)$$

Для випадку штучного вдування повітря в кавітаційну суперкаверну в першому наближенні (без урахування розриву суцільності основного потоку СЛВ) була виконана оцінка залежності швидкості на межі суперкаверни від швидкості вдування. Якщо прийняти, що на вході до робочої камери кавітатора: значення швидкості та тиску потоку СЛВ складають P_{bsw} , V_{bsw} ; швидкість і тиск повітря, що вдується, складають P_a , V_a ; швидкість та тиск на межі каверни потоку

СЛВ складають P_c , V_c , то швидкість потоку на кордоні каверни може бути знайдена як

$$V_c = V_{bsw} \sqrt{1 + \Omega} + \frac{\rho_a V_a^2}{2} \quad (6)$$

ρ_a - щільність повітря, кг/м³; V_a - швидкість подання повітря, м/с.

Оскільки в СЛВ завжди присутні розчинені гази, то на початковій стадії виникнення каверни необхідно враховувати їх масу. Для випадку, коли зовнішні межі кавітаційної каверни обмежені плоским прямокутним каналом, маса розчинених газів дорівнює

$$G_g = \frac{4}{3} \frac{C_g}{K} bL^3 \quad (7)$$

де G_g - маса газу всередині каверни в момент її виходу на стійкий стан; C_g - початкова концентрація газу в потоці СЛВ; K - постійна Генрі; b - товщина каверни; L - довжина каверни.

4. Теоретичне дослідження процесу розділу СЛВ на компоненти

Початкові постулати. Математична модель, що описує динамічну поведінку кавітаційної суперкаверни з урахуванням процесу її штучної вентиляції була розроблена на основі гіпотези:

- потік СЛВ, що моделюється, є ідеальним і має вагу;
- потік, що знаходиться за межами каверни, є нестислим;
- початок та закінчення кавітаційної каверни завжди відомі та відповідають входу та виходу в робочу камеру сепаратора;
- вагу газової складової всередині каверни можна враховувати за допомогою гідростатичного тиску;
- на початку процесу сепарації повітря для вентиляції каверни надходить до неї у кожній точці її початкового перерізу;
- основний потік СЛВ є плоским та одномірним.

Основні рівняння та розрахункова схема. У формі Ейлера рух основного потоку поза каверною було записано у такому вигляді

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = \rho g y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (8)$$

Рух паро-водяної суміші в середині каверни має аналогічний вигляд

$$\frac{\partial V_{st}}{\partial t} + V_{st} \frac{\partial V_{st}}{\partial x} = \rho_{st} g y - \frac{1}{\rho_{st}} \frac{\partial P_{st}}{\partial x} \quad (9)$$

На межі розділу основного потоку СЛВ та суперкавітаційної каверни повинні завжди виконуватись дві наступні умови

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_{st}}{\partial x} \quad (10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V_{st}}{\partial x} \quad (11)$$

Жорсткі граничні умови моделюють безпосередній вплив стінок робочої камери каналу кавітації. На відміну від вільної поверхні розділу, що відповідає зовнішній межі суперкаверни з оброблюваним потоком СЛВ на жорстких стінках робочої камери сепаратора, необхідно виконувати умову повного непротікання. У цьому випадку граничними умовами для вирішення загальних рівнянь руху потоку СЛВ та парогазової суміші (8)-(9) є:

- жорсткі стінки зі сторони головного потоку СЛВ:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial x} \quad (12)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

- жорсткі стінки всередині кавітаційної каверни:

$$\frac{\partial P_{st}}{\partial x} = P_{s.st} \quad (14)$$

$$\frac{\partial V_{st}}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

t - час, с; n - координата нормалі до поверхні, м; P_{st} – тиск пари, Па;
 $P_{s.st}$ – тиск насиченої пари, Па.

Розрахункова схема. Для проведення теоретичних досліджень процесу штучної вентиляції суперкавітаційної каверни з урахуванням чисельних методів була розроблена розрахункова схема. При її використанні була прийнята гіпотеза про те, що:

- конструкція робочої камери кавітаційного каналу передбачає чітке замикання кордонів суперкаверни на вихідну жорстку стінку (всі інші випадки вважаються такими, що не є технологічно припустимими);

- швидкість на межі каверни приймалася рівною швидкості потоку в розрахунковому перерізі, який збігається з входом в кавітаційний канал. Така умова узгоджується з експериментальними результатами роботи [7] і в цьому випадку вплив нестационарних явищ у хвостовій частині каверни на умови обтікання її головної частини відсутні.

Перевагою запропонованої розрахункової схеми є подолання парадоксу Бріллуена - на межі каверни швидкість є величиною постійною та відмінною від нуля. У своїй хвостовій частині вона містить критичну точку з нульовою швидкістю, яка при цьому фізично відповідає верхній кромці вихідної пластини. За рахунок такої фіксованої точки задовольняється умова Жуковського-Чаплигіна – під час проведення розрахунків має місце плавне сходження ліній струму з поверхні кавітаційної суперкаверни.

Для вирішення диференціальних рівнянь математичної моделі процесу сепарації СЛВ було використано метод кінцевих різниць. В цьому випадку вся розрахункова область розбивалася на розрахункові перерізи з рівномірним кроком. Розмір кроку вздовж віссі ОХ і ОУ вибиралася виходячи з результатів попередніх розрахунків і зазвичай становила $(x_{i+1} - x_i) = L \cdot 10^{-4}$ та $(y_{i+1} - y_i) = H \cdot 10^{-6}$.

Всі складові рівнянь математичної моделі відповідають суцільному однорідному потоку СЛВ. При використанні кінцево-різницевого методу, що передбачає заміну суцільного середовища дискретним вони були розписані за допомогою їх різницевих аналогів. Залежно від розташування розрахункової точки стосовно твердих меж розрахункової області були використані центральні, лівосторонні і правосторонні різниці другого порядку вірогідності.

5. Результати досліджень

При моделюванні процесу сепарації СЛВ була визначена залежність подовження каверни L по відношенню до ширини робочого каналу кавітаційного сепаратора СЛВ. Розрахунок проводився без урахування вдування повітря, оскільки відповідно до висновків роботи [7] на геометрію каверни не впливає ні спосіб її створення ні форма тіла, за якою вона утворюється. Результати розрахунків показані на рисунку 1, де видно, що зниження швидкості потоку, відповідне графіку зростання числа кавітації призводить до істотного скорочення розмірів каверни. Робочі розміри кавітаційної каверни лежать в діапазоні чисел кавітації від 0,1 до 0,15. В цьому випадку довжина каверни становить від 5 до 4 калібрів ширини робочої камери кавітаційного каналу.

Для контролю розрахункових даних щодо зростання кавітаційної каверни в поперечному перетині по всій її довжині використовувалися результати роботи [7]. Для необмеженого потоку в цій роботі пропонується використання співвідношення виду

$$\frac{D_{max}}{d} = \frac{0.955}{\sqrt{\Omega}} \quad (16)$$

де D_{max} – максимальний діаметр кавітаційної каверни, м; d – діаметр насадки, за яким створюється кавітаційна каверна, м.

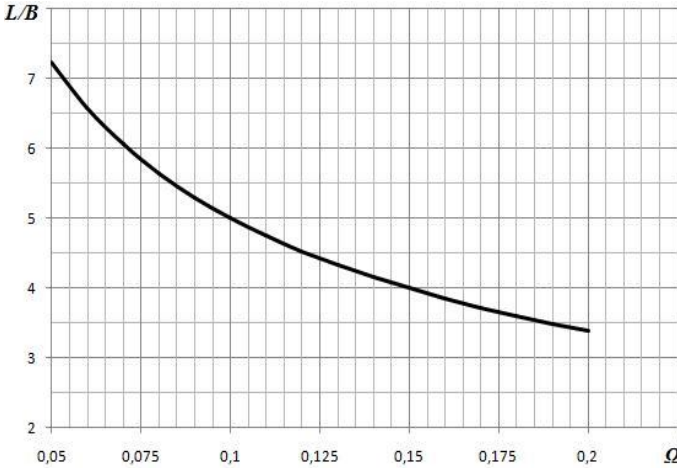


Рис. 1. Залежність довжини каверни від швидкості потоку

Результати розрахунку, які відповідають кавітаційній каверні, що виникає за плоскою входною стінкою кавітаційної камери сепаратора СЛВ показані на рисунку 2. На ньому видно, як змінюється ширина каверни в залежності від зростання входної швидкості потоку у двох випадках – необмеженому потоці та в потоці, який обмежений двома твердими стінками. Порівняльний аналіз графіків показує, що наявність жорстких стінок, що стискають потік, призводить до зменшення поперечного розміру кавітаційної каверни в порівнянні з випадком, коли кавітаційна порожнина утворюється в необмеженому потоці. Відмінність у графіках також можна пояснити різною формою насадок, що моделювалися в розрахунках (диск і прямокутна пластина).

При проведенні розрахунків було виконано оцінку ступеня впливу жорсткої горизонтальної межі робочої камери кавітаційного каналу на деформацію нижнього контуру кавітаційної каверни. Розрахунок ординат профілю каверни був проведений для трьох значень відносної висоти \bar{h} входної пластини кавітатора. Ця величина розраховувалася як відношення висоти передньої стінки на входному отворі робочого каналу h до загальної висоти кавітаційного каналу H .

Результати розрахунків показані на рисунку 3, де видно, що падіння величини \bar{h} призводить до вирівнювання контуру каверни до плоскої форми.

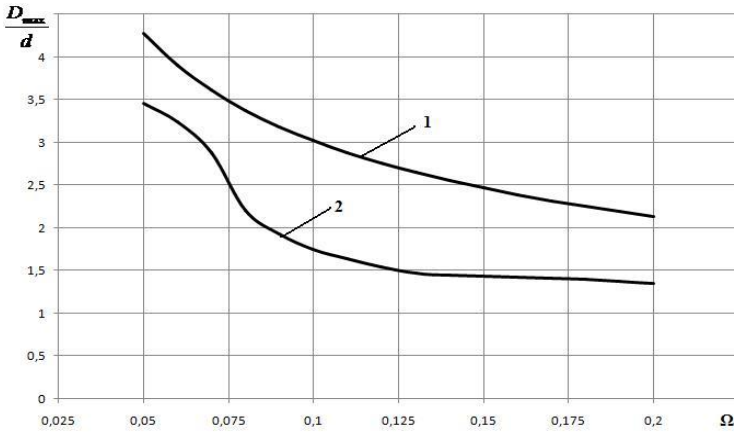


Рис. 2. Вплив швидкості потоку на ширину кавітаційної суперкаверни. 1 – розрахунок для необмеженого потоку; 2 – розрахунок для обмеженого потоку

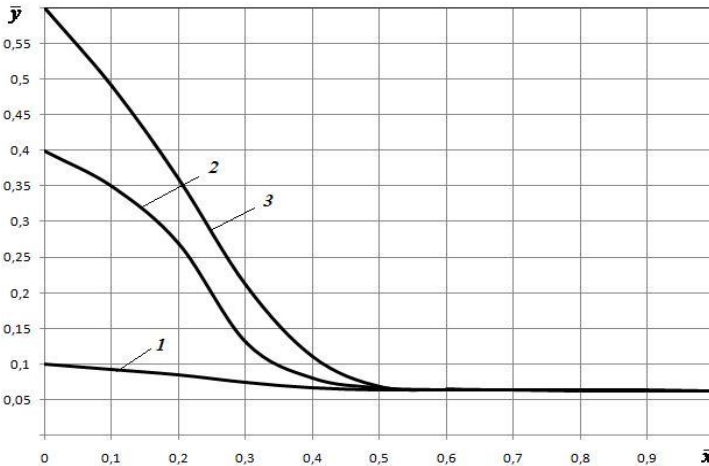


Рис. 3. Вплив геометрії течії на контур каверни
1 – $\bar{h}=0.1$; 2 – $\bar{h}=0.4$; 3 – $\bar{h}=0.6$

Горизонтальна вісь на рисунку 3 відповідає відносному подовженню каверни $\bar{x} = \frac{x}{L}$, а вертикальна вісь - зміні її відносної ординати $\bar{y} = \frac{y}{H}$.

Специфічна особливість процесу сепарації СЛВ визначається проявом головної фізичної властивості СЛВ – густини. Основні нафтовмісні компоненти не підпорядковуються відомому закону Ньютона. Тому структура багатофазного потоку повинна розглядатися як решітка, що містить воду. Ця решітка в свою чергу складається з набору молекул парафіну і смол, що хаотично розташовуються між собою [4].

У разі коли густина потоку СЛВ є невідомою її можна в першому наближенні знаходити за значеннями величин густини складових n компонент з урахуванням їх об'ємного вмісту a_i .

$$\nu = \nu_1 a_1 + \nu_2 a_2 + \dots + \nu_n a_n \quad (17)$$

Через яскраво виражену нелінійність реологічних властивостей у потоці СЛВ завжди присутній сильний опір дотичних напружень зсуву. З цієї причини більшість конструкцій гідродинамічних сепараторів суднових лляльних вод використовують плескаті канали, всередині яких має місце стратифікація оброблюваного потоку за густиною. При розрахунках була виконана оцінка величини падіння тиску всередині двомірного плоского каналу, стінки якого становлять дві паралельні площини. Значення кінематичної в'язкості потоку СЛВ бралися ідентичними і дорівнювали $\nu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$.

Для різних значень густини потоку СЛВ було встановлено, що зростання цього параметру призводить до збільшення величини падіння тиску при його русі. Щодо запропонованого методу гідродинамічної кавітаційної сепарації можна стверджувати, що за інших рівних умов у цьому випадку настання процесу кавітації слід очікувати за менших швидкостей руху. При цьому величина швидкості безпосередньо визначається величиною надлишкового тиску, чим вище надлишковий тиск в суміші СЛВ, що прокачується, тим вище буде вплив кавітації на ефективність технологічного процесу сепарування.

Оскільки при виникненні кавітації в потоці СЛВ каверна, що виникає, при гідромеханічному підході може розглядатися, як місцевий опір, то цікавість оцінка величини коефіцієнта її опору. Цей параметр рекомендується розглядати як суму індуктивного та двох профільних опорів

$$C_x = C_{x \text{ ind}} + C_{x \text{ t.w.}} + C_{x \text{ b.l.}} \quad (18)$$

де $C_{x \text{ ind}}$ - індуктивний опір, що залежить від ступеня подовження каверни і кута атаки потоку, що набігає на каверну; $C_{x \text{ t.w.}}$ - профіль-

ний кавітаційний опір, що викликається турбулентним слідом за каверною та нестационарним режимом замикання її кордонів; $C_{x\ b,l}$ - профільний грузький опір, що викликається за наявності жорстких перешкод прикордонним шаром, що виникає на них.

Усі складові виразу (18) безпосередньо визначаються процесами утворення вихорів уздовж межі розділу кавітаційної каверни. Індуктивний опір викликається переважно поздовжніми вихорами на межах кавітаційної каверни, а профільний опір - поперечними вихорами на її межах.

Висновки

Сучасні методи сепарації СЛВ на судах мають один загальний недолік. При реалізації на судні очищення СЛВ завжди є односпрямованою. Під час процесу сепарації вихідним продуктом є лише одна водна компонента, а вторинні продукти нафтохімії з високим ступенем концентрації дуже складно отримати у чистому вигляді та надалі їх використовувати неможливо.

Якісним розв'язанням проблеми утилізації СЛВ може бути використання нового методу сепарації, який використовує гідромеханічний підхід. При створенні штучним шляхом за рахунок вдунання повітря кавітаційної каверни в потоці, що рухається, СЛВ можливо безперервно відбирати насичену водяну пару, що утворюється, і таким чином отримувати компоненти СЛВ.

При створенні штучної суперкаверни за рахунок вдунання повітря для обробки СЛВ швидкість, що викликається гідродинамічними особливостями всередині кавітаційного каналу, на межі каверни в основному визначатиметься горизонтальними складовими швидкостей повітря та оброблюваного потоку СЛВ.

Під час використання процесу кавітації для сепарації СЛВ робочий тиск повинен знижуватися і це пониження має завжди компенсуватися зростанням температури потоку СЛВ, що обробляється.

Перелік використаних джерел

1. MARPOL 73/78 - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973. 584 p.
2. Bashan, V., Demirel, H., Celik, E. 2022. Evaluation of critical problems of heavy fuel oil separators on ships by best-worst method.
3. Amran, N. A., Adibah, S. M., 2020. Oil-Water Separation Techniques for Bilge Water Treatment. Resources of Water. DOI%

10.5772/intechopen.91409.

4. Kolmetz, K., 2011, Separator vessels selection sizing and troubleshooting, Handbook of Process Equipment Design.

5. Mutch, G. A., 2022. Electrochemical separation processes for future societal challenges. Cell Reports Physical Science. Volume 3, Issue 4.

6. Nesteruk, I., 2012. Supercavitation: Advances and Perspectives A collection dedicated to the 70th jubilee of Yu.N. Savchenko, Springer. 240 p.

7. Egorov, I.T., 1971. Artificial cavitation. Leningrad: Shipbuilding. 284 p.