

УДК 629.5.064.3

Афтанюк В.В., Афтанюк А.В., Даниленко Д.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ВИХРОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОМБІНОВАНОГО СКРУБЕРА

ANNOTATION

The article presents a simulation of the vortex element of a combined scrubber for cleaning contaminated gases from SO_x emitted into the atmosphere by ship engines.

The complexity of the design of the combined scrubber predetermines the complexity of the simulation of hydrodynamic modes of its operation. Scrubber modeling is divided into several local models. A separate model is considered modeling gas flows in a vortex scrubber element.

To simulate aerodynamics, a solid model of a vortex element was built into a special virtual experimental stand.

To simulate aerodynamics, a solid model of a vortex element was built into a special virtual experimental stand.

The experimental stand includes: a vortex element Ø50 mm; plate section Ø80 mm; flow simulation cylinder Ø 80 mm, long 150 mm. To simulate the rotation of the flow, the stand included a special element “zone of rotation” which allows changing the speed of rotation of the flow in the swirl.

The algorithm for modeling the flow of gas in a vortex element includes the following steps: the creation of a solid model; setting boundary conditions; definition of restrictions; the task of air flow at the entrance and exit; gas flow analysis (velocity and pressure); visualization of simulation results.

In the course of a numerical experiment, rational installation angles of axial-blade swirlers, installation height of the baffle disk were determined.

Simulation of the speed streamlines showed the presence of a swirling zone of gas flow around the rack of the baffle disk, the minimum gas velocities are observed above the baffle disk and a special channel to ensure internal circulation of the fluid.

Analysis of the pressure diagrams in the experimental test bench allowed us to determine the nature of the pressure distribution; a reduced pressure is observed in the zone of increased turbulence in the flows.

The results of the study of the distribution of velocities and pressures in the vortex element allow us to proceed to the study of the following modeling blocks of the combined scrubber.

The simulation results allowed to determine the distribution of velocities and pressures in the vortex scrubber element. The developed model can be used as a separate unit in larger models of cleaning systems, which include several types of scrubbers for various industries.

Keywords: shipboard systems for cleaning emissions of SO_x, solid-state scrubber models, numerical simulation of gas flows.

Постановка проблеми і її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Сучасні вимоги Додатку VI до конвенції MARPOL, з метою захисту навколишнього середовища від викидів сірки (SO_x), встановлюють загальне обмеження максимального вмісту сірки в паливі (1% від загальної ваги). В якості альтернативи можна застосувати систему очищення вихлопних газів для зниження загального викиду оксидів сірки допоміжним і головним пропульсивними двигунами суден, що підраховується як сумарна маса викиду оксидів сірки [1].

Аналіз досліджень і публікацій. Провідними виробниками суднових двигунів (MAN Diesel, Wärtsilä та ін.) в якості стандартизованої, базової системи очистки викидів двигунів від SO_x рекомендується система очищення в якій використаний полий охолоджувальний скруббер з протитечією [2-4].

До переваг полого скрубера слід віднести: простоту конструкції, невелика гідравлічний опір, надійність при експлуатації. Недоліками цих апаратів є громіздкість, мала питома продуктивність, необхідність забезпечення чистоти вихідної промивної води [5].

Для поліпшення технології очищення рекомендується використання комбінованих скрубберів (Hybrid Scrubber System) [6], в яких в одному апараті реалізуються послідовно «промивний» і «насадковий» способи очищення газу від SO_x.

З досвіду експлуатації насадкових скрубберів [7], відомо, що їх недоліками є забивання каналів між елементами насадки, що різко збільшує гідравлічний опір фільтруючого шару і знижує продуктивність апарату.

Для забезпечення стабільного гідравлічного опору насадки запропонована конструкція вихрової тарілки [8], яку можна використувати в комбінованих «морських» скруберах для очищення вихлопних газів суднових двигунів від SO_x .

Однак проектування нових технічно складних пристроїв сучасних суднових двигунів або суднових систем неможливо без використання програмного забезпечення яке дозволяє провести модельні розрахунки та оптимізацію обладнання, що розробляється.

Одним з найбільш поширених програм дозволяють проводити комп'ютерне моделювання і аналіз течій рідини в тривимірних моделях пристроїв є програмний комплекс SolidWorks з додатком Flow Simulation [9].

Метою роботи є дослідження конструкції вихрового елемента скрубера шляхом створення за допомогою SolidWorks та Flow Simulation [9] тривимірної твердо-тільної моделі і комп'ютерне моделювання течій газу в ній.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для інтенсифікації процесу очистки викидів SO_x від суднових двигунів запропонована конструкція комбінованого скрубера (рис. 1).

Принцип роботи комбінованого скрубера полягає в наступному (рис. 1): забруднений газ, що видаляється від суднових двигунів надходить в I ступінь очистки - полий скрубер (де реагує з рідиною), після чого газ проходить через II ступінь очистки - насадковий скрубер з вихровою тарілкою. Застосування вихрової тарілки дозволяє забезпечити стабільну роботу обох ступенів апарату з постійним гідравлічним опором, виключити забивання насадки, управляти режимом очистки на II-го ступеня (шляхом регулювання кількості зрошуваною рідини і ступенем закручування потоків, що проходять через вихрову тарілку).

Складність конструкції комбінованого скрубера зумовлює складність комп'ютерного моделювання гідродинамічних режимів його роботи. Комплексне моделювання течій газу (в одній моделі) такого апарату вимагає значної потужності «комп'ютерних ресурсів» і часу для здійснення розрахунків. Тому для спрощення моделі раціонально використовуючи кібернетичний підхід до розробки хіміко-технологічної апаратури запропонований в [10] розбити модель апарату на ряд локальних модельних блоків.

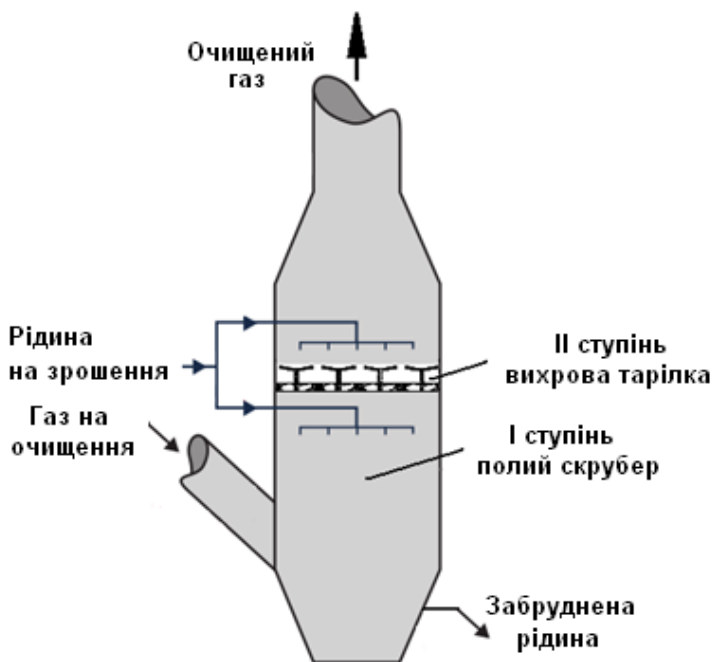


Рис. 1. Принципова схема комбінованого скрубера з вихровою тарілкою.

Комп'ютерне моделювання конструктивного виконання та гідродинамічного режиму роботи комбінованого скрубера з вихровою тарілкою включає наступні модельні блоки:

1. Створення твердо-тілих моделей елементів апарату.
2. Створення твердо-тілої «збирання» апарату.
3. Моделювання гідродинаміки завихрувачів вихрової тарілки II-го ступеня скрубера.
4. Моделювання щільності зрошення I-го ступеня - полого скрубера.
5. Моделювання гідродинаміки вхідного патрубку забрудненого газу.
6. Моделювання фільтрації твердих частинок через рідинний шар вихрової тарілки.
7. Візуалізація течій в «зборці» апарату.

Розділення моделі на ряд перерахованих блоків дозволяє зробити окремий аналіз роботи I та II ступені скрубера, причому аналіз гідродинамічних режимів можна проводити в міру створення твердо-тільних моделей елементів апарату.

На першому етапі моделювання була створена твердо-тільна модель (зборка) вихрової тарілки з завихрювачами (рис. 2).

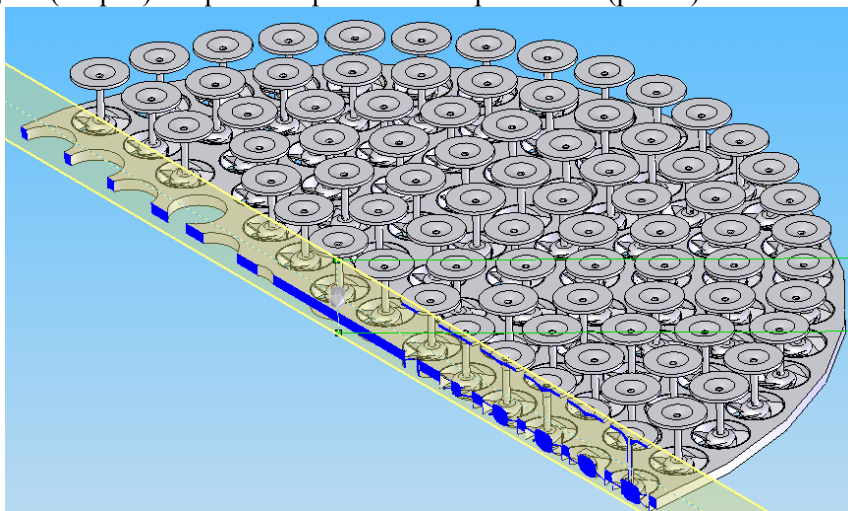


Рис. 2. Переріз вихрової тарілки комбінованого скрубера.

Тарілка скрубера містить 163 вихрових елемента, які представляють собою аксіально-лопатковий завихрювач зі спеціальним відбійним диском всередині якого виконані отвори (рис. 3).

Робота вихрового елемента полягає в наступному: забруднений газ надходить знизу апарату, потрапляє в завихрювач, де закручується і тече вздовж стійки відбійника (рис. 3). Зверху на тарілку надходить зрошувальна рідина (рис. 1). За рахунок взаємодії потоку забрудненого повітря і зрошувальної рідини на поверхні тарілки утворюється пінний фільтруючий шар, через який проходить газ і очищається від твердих частинок і оксидів сірки.

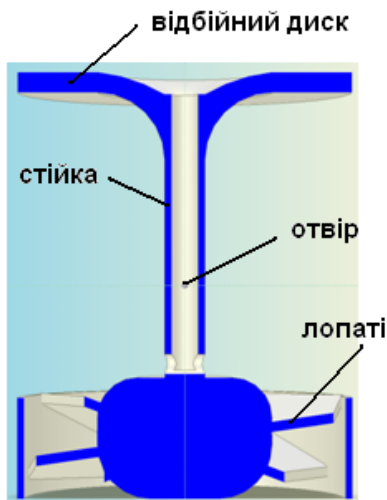


Рис. 3. Переріз твердо-тільної моделі вихрового елемента.

Одним з основних факторів, що впливають на щільність і пористість піни є ступінь закручування газового потоку що проходить крізь завихрувачі.

Моделювання руху газу в вихровому елементі проводився окремо в процесі числового експерименту визначалися раціональні кути установки, кількість лопатей аксіально-лопаткових завихрувачів (рис. 4б) та висоту установки відбійного диска.

Для реалізації такого числового експерименту був створений віртуальний експериментальний стенд (рис. 4а), який включав: вихровий елемент $\varnothing 50$ мм (1); ділянку тарілки $\varnothing 80$ мм (2); циліндр моделювання потоку $\varnothing_{\text{вн}} 80$ мм, довжиною 150 мм (3).

Для моделювання обертання потоку стенд включав спеціальний елемент «зона обертання», що дозволяє змінювати швидкість обертання потоку в завихрувачі (рис. 4б).

Алгоритм моделювання течії газу в вихровому елементі включає наступні етапи: створення твердо-тільної моделі; завдання граничних умов; визначення обмежень; завдання витрат повітря на вході та виході; аналіз перебігу газу (швидкість і тиск); візуалізація результатів моделювання.

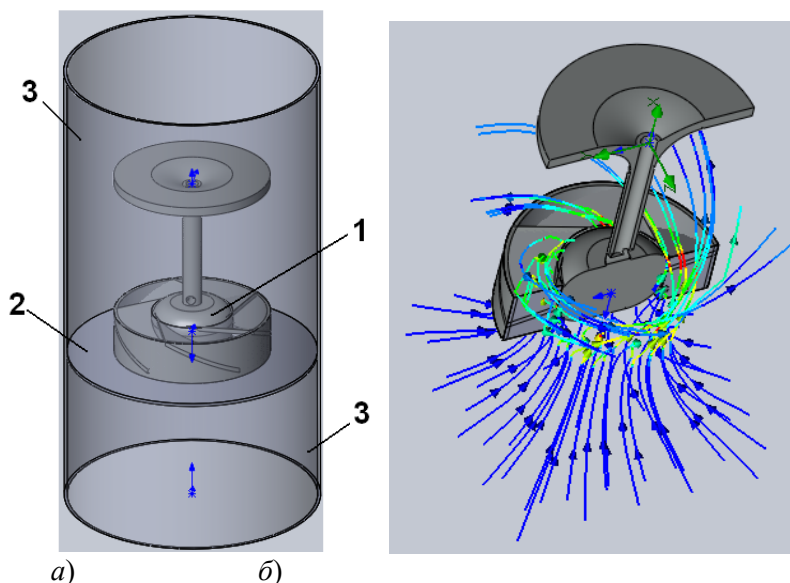


Рис. 4. Віртуальний експериментальний стенд для дослідження вихрових елементів комбінованого скрубера:

а - загальний вигляд; б - візуалізація зони обертання.

Результати досліджень (рис. 5) розподілення швидкостей показують, що завихрувач забезпечує високу ступінь закручування потоку газу навколо стійки відбійного диска (рис. 5а). У центрі відбійного диска і в порожнинах отворів в стійці спостерігаються зони знижених швидкостей газу (рис. 5б), що сприяє «втягуванню» рідини з поверхні відбійного диска і подачу її закручений потік, тобто забезпечується внутрішня циркуляція рідини з утворенням стійкого пінного шару.

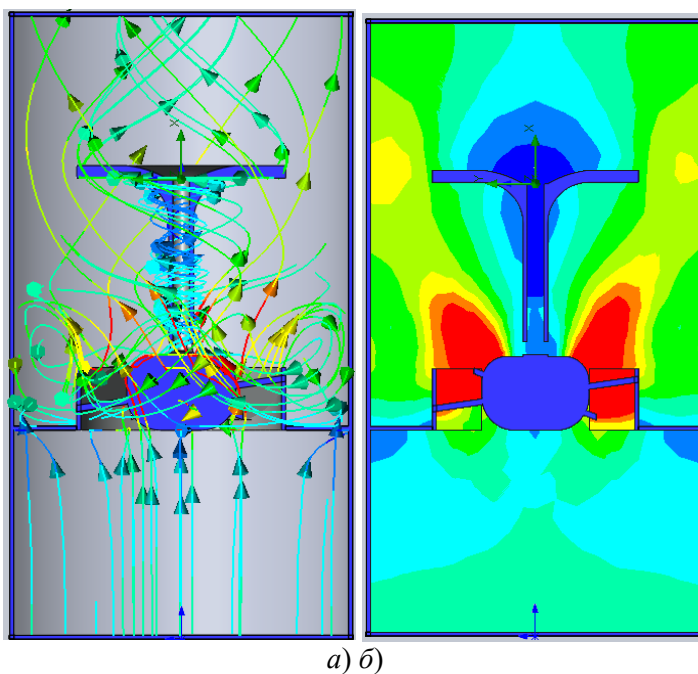


Рис. 5. Модування течії газу (швидкість) у вихровому елементі комбінованого скрубера: а - лінії струму; б - картина в перерізі.

Візуалізація розподілу тисків (рис. 6) при перебігу газу через вихровий елемент показала, що розподіл тисків у вихровому елементі в основному повторюють траєкторії ліній струму отримані при дослідженні швидкості руху газу. У зоні відбійного диска (після завихрувача) спостерігається знижений тиск, що пояснюється більш високими швидкостями і турбулентністю течій на цій ділянці.

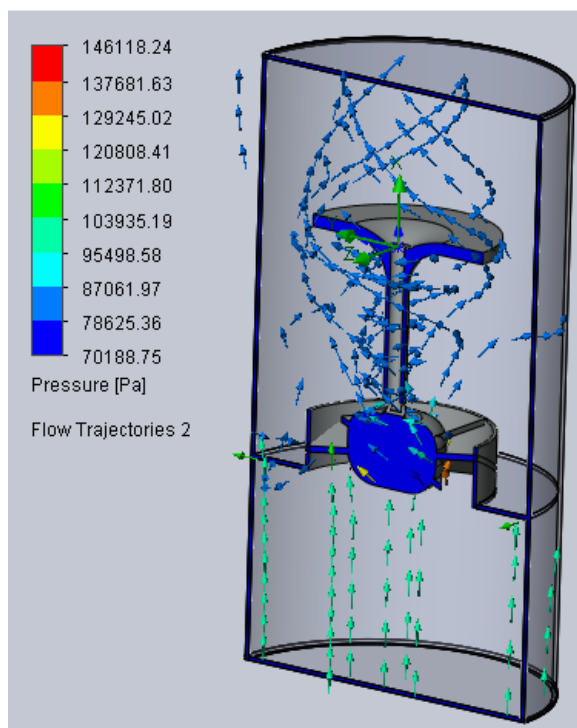


Рис. 6. Моделювання течії газу (тиск) в вихровому елементі комбінованого скрубера.

Висновки

1. Для дослідження течій газу в комбінованому скрубєрі розроблена твердо-тільна модель вихрового елемента.
2. Розроблено конструкцію віртуального експериментального стенду дозволяє досліджувати течії газу через вихровий елемент з урахуванням обертання потоку газу.
3. Числове моделювання ліній струму швидкості показало наявність зони закручування потоку газу навколо стійки відбійного диска, мінімальні швидкості газу спостерігаються над відбійним диском та спеціальному каналі для забезпечення внутрішньої циркуляції рідини.

4. Аналіз епюр тиску в експериментальному стенді дозволив визначити характер розподілу тисків, знижений тиск спостерігається в зоні підвищеної турбулізації потоків.

5. Результати проведеного дослідження розподілу швидкостей і тисків в вихровому елементі дозволяють перейти до дослідження наступних моделюють блоків комбінованого скрубера.

Закінчення

Розроблена твердо-тільна модель буде використана, як елемент збірки, при створенні моделі комбінованого скрубера для очищення викидів суднових двигунів від сполук SO_x.

Розроблена модель вихрового елемента і віртуальний експериментальний стенд можуть бути використані при проведенні науково-дослідних, дисертаційних робіт магістрантів, аспірантів, наукових працівників для порівняльної оцінки ефективності закручених потоків, дослідження розподілу швидкостей і тисків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Руководство по средствам защиты окружающей среды компании Wärtsilä // Сайт фірми Варстисля. Режим доступу: <http://www.wartsila.com>.

2. WÄRTSILÄ ENCYCLOPEDIA OF SHIP TECHNOLOGY/ Jan Babicz. – Helsinki, 2015. – 663 p.

3. Emission Project Guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines / MAN Diesel & Turbo Tegholmsgade 41 2450 Copenhagen SV, Denmark, 2017. -108 p.

4. HERE. Международный журнал компании «Альфа Лаваль». № 30. 2012. С. 10-13.

5. Афтанюк В.В. К вопросу совершенствования очистки газов в мокрых пылеуловителях./ Афтанюк В.В., Спинов В.М. // Сборник материалов НТК «Энергосбережение в системах отопления, вентиляции и кондиционирования. 23-24 мая 2003 г. – Одесса. -2003 р. – С. 47-49.

6. ABS ADVISORY ON EXHAUST GAS SCRUBBER SYSTEMS / American Bureau of Shipping, 2018. – 52 p. Режим доступу: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/exhaust-gas-scrubber-systems-advisory.pdf>.

7. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: Справочное издание/ М.Г. Ладыгичев, Г.Я. Бернер. – М.: Теплотехник, 2004. – 696 с.

8. Пат. 3615 Україна, МПК 7 B01D3/22. Вихрова тарілка для тепломасообмінних апаратів / Афтанюк В.В., Спинов В.М.; заявл. 30.12. 2003; опубл. 15.12.2004, Бюл. №12.

9. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. – СПб.: БХВ - Петербург, 2005. – 800 с.

10. Системный анализ процессов химической технологии: основы стратегии: монография / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов; отв. ред. Н.М. Жаворонков. –М.: Издательство Юрайт, 2018. – 499 с.