DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-2-78-42>

УДК 536.24:533.6.011

Олійник В.С., Баранюк О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ЯВИЩА РЕСУСПЕНЗІЇ ПІД ЧАС ДЕМОНТАЖУ КОНСТРУКЦІЙ
«ОБ'ЄКТУ УКРИТТЯ» ПІД НОВИМ БЕЗПЕЧНИМ КОНФАЙМЕНТОМ**

Анотація. Робота присвячена прогнозуванню розподілів напрямків руху повітряних потоків, що здатні переносити радіоактивні аерозолі з приміщень «об'єкту укриття» в основний об'єм Нового безпечного конфайменту (НБК) через дах «об'єкту укриття». Розподіл радіоактивних аерозолей, або концентрація радіації, визначає умови роботи персоналу в зоні НБК, час допустимого перебування та рівень захисту. Потрапляння радіоактивних аерозолей за межі НБК є вкрай небажаним явищем, оскільки це наносить екологічну шкоду оточуючому середовищу. В результаті проведеного моделювання сценарію завантаження відходів в контейнер із виділенням радіоактивних аерозолей свідчить, що на початку завантаження контейнера активність перевищує 2 кБк/м^3 , що в десять разів перевищує норму. Це важливо враховувати при плануванні робіт під НБК. Отриманий розподіл радіоактивних аерозолей на поверхні «об'єкту укриття» в результаті осідання частинок дозволяє більш ефективно усувати наслідки демонтажу із генерацією аерозолей.

Ключові слова: моделювання, ресуспензія, радіоактивні аерозолі, вільна конвекція.

Oliinyk Vladislav, Baraiuk Olexandr

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**CFD-SIMULATION OF THE RESPENSION PHENOMENON DURING
THE DISMANTLING OF STRUCTURES OF THE «OBJECT OF COVER»
UNDER THE NEW SAFE CONFINEMENT**

Summary. One of the most important advantages of CFD modeling methods over existing simplified models is their ability to accurately and visually visualize the predicted distributions of airflow directions. The calculations performed in the framework of the NATO project carried out by the laboratory of simulation of heat and mass transfer processes of the Institute of Technical Thermophysics of the NAS of Ukraine show that the air flow is able to transfer radioactive aerosols from the premises of the "object of cover" to the main volume of the New Safe Confinement (NSC). The distribution of radioactive aerosols, or the concentration of radiation, determines the conditions of work of personal in the NSC area, the time allowed to stay and the level of protection. The release of radioactive aerosols outside the NSC is extremely undesirable as it causes ecological damage to the environment. The phenomenon where particles that settle on the surface are re-raised is called resuspension. During the dismantling of «shelter» structures, radioactive dust is most likely to be released into the environment due to resuspension. Therefore, the purpose of this work was to investigate the dynamics of dust particles (in particular, resuspension) and its consideration in the modeling of the NSC, in particular, in the reproduction of individual scenarios for the dismantling of the structure of «object of cover». As a result of the simulation of the scenario of loading waste into the container with the release of radioactive aerosols shows that at the beginning of loading the container activity exceeds 2 kBq/m^3 , which is ten times higher than the norm. It is important to take this into account when planning work under the NSC. The results of the verification of the model indicate a coincidence with the known experimental works in the literature. It should be noted that there is a slight discrepancy between the simulation results and the experimental data, which is related to the assumptions made in the aforementioned works, about the reliability of the estimation of the secondary rise from the surfaces at low flow rates. The obtained distribution of radioactive aerosols on the surface of the «object of cover» as a result of sedimentation of particles allows to more effectively eliminate the effects of dismantling with the generation of aerosols.

Keywords: modeling, resuspension, radioactive aerosols, free convection.

Постановка проблеми. Природна конвекція викликана невеликими різницями температур між твердими об'єктами, такими як поверхні «об'єкту укриття» (ОУ), обшивка Арки Нового безпечного конфайменту (НБК) і т.д., призводить до переносу радіоактивних аерозолей (РА) з приміщень ОУ в основний об'єм НБК через дах ОУ, що є вкрай небажаним явищем, оскільки це наносить екологічну шкоду оточуючому середовищу [1].

Умови вільної конвекції також є сприятливими для вторинного підйому РА з поверхонь (ресуспензія) та подальший їх рух разом з потоками повітря.

Ресуспензія (також називається повторним видаленням) відповідає про-цесу, де частинки, що осідають на поверхні, повторно підіймаються. Залежно від галузі, ресуспендування може бути бажаним явищем або для обмеження забруднення поверхні (наприклад, накопичення пилу на сонячних елементах), або його слід уникати, коли нанесені частинки є небезпечними матеріалами (наприклад, радіоактивними частинками на атомних електростанціях або частинки забруднюючих речовин у лікарнях) [2].

Оскільки пил може бути радіоактивним (сорбує радіацію), токсичний, або хімічно реактивний, він має небезпеку. Пил мобілізується процесом

ресуспензії під час вітрового пориву і поширюється в навколишнє середовище [1].

Крім того, ресуспензію слід розглядати як основне джерело РА під НБК [3]. Тому метою даної роботи стало дослідження динаміки часток пилу (зокрема, ресуспензії) та її врахування при моделюванні НБК, зокрема, при відтворенні окремих сценаріїв робіт з демонтажу конструкції ОУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перші роботи, присвячені розробці математичних моделей і методик моделювання явищ ресуспендування з'явилися на початку століття (Henry C., Minier J., Nasr B., Dhaniyala S.). Вплив турбулентності потоку на ресуспензію частинок вивчали Henry C., і Minier J [4]. Автори Nasr B., та Dhaniyala S. досліджували механізми адгезії частинок. В роботі Vainshtein P. [7], зроблено висновки про те, що моделювання ресуспендування має ґрунтуватися на накопиченні енергії обертання за допомогою коливання частки навколо нерівностей поверхні, що обумовлено аеродинамічними моментами, зумовленими опором, а не підйомними силами. Найбільш перспективними моделями ресуспендування є моделі Rock'n'roll, розробники яких - Reeks M., і Hall D. [6]. Завдяки достатній кількості експериментальних даних в літературі, які порівнюють модель ресуспензії Rock'n'Roll (RnR) із експериментом, саме цю модель слід використати для імплементації в CFD модель НБК та ОУ.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Існує ряд проблем, пов'язаних з динамікою частинок, і придатність моделі для конкретного застосування повинна спиратися на здатність цієї моделі відтворювати властивості потоку і динаміку частинок. Особливий інтерес представляє проблема ресуспендування частинок в пристінному турбулентному потоці.

Ця робота присвячена розробці моделі ресуспендування, яка могла б правильно передбачити або описати процес ресуспендування частки в пристінному турбулентному потоці. Слід зробити висновок, що процес ресуспендування частинок повинен розглядатися як випадковий за своєю природою, причому його випадковість визначається динамікою часток, а також турбулентністю в пристінному потоці. Крім впливу пристінної турбулентності, слід зазначити, що на випадковість руху частинки також впливають такі фактори, як шорсткість поверхні, розмір і геометрія частинок, матеріал частинок, поширення капілярних сил і т.д.

Мета статті. Метою представленої роботи є розробка гідродинамічної моделі потоку, яка зможе відтворити характер потоку у пристінній області. Стосовно моделювання руху частинки, необхідно дослідити основні механізми підйому частинки в даних умовах та обрати відповідну модель ресуспензії.

Для досягнення цієї мети вирішено поділити проблему на дві частини: перша частина присвячена випадковому руху частинки, а друга частина присвячена моделюванню пристінної турбулентності. Як тільки ці дві частини будуть вирішені, загальна модель для процесу ресуспендування може бути виведена шляхом об'єднання

Рис. 1. Експериментальна ділянка для дослідження ресуспензії [5]

цих двох частин, щоб отримати більш практичну, але фізично життєздатну модель.

Виклад основного матеріалу. Для верифікації моделі ресуспензії було створено тестову CFD модель, яка відтворює умови експерименту, що описані в статті [5]. Стенд (рис. 1) є складовою частиною аеродинамічної труби і складається з підстилки, на якій розміщуються попередньо зважені частинки аерозолів. Підстилка розташована в робочій частині аеродинамічної труби з прозорим верхом для можливості фотографічного фіксування кількості частинок, що лишилися на поверхні.

В результаті було відтворено канал довжиною 5м і перерізом 0.2 x 0.02 м з поверхню, яка представляє підстилку з частинками аерозолів довжиною 0.5 м і шириною 0.15 м, що розташована в центрі каналу. Така довжина каналу дозволяє стабілізувати течію перед досягненням підстилки з аерозолями. Ступінь шорсткості поверхні у роботі [5] не вказана і тому, в представлений роботі вона була підібрана у відповідність із середнім значенням для гладкої поверхні та шорсткості (5мкм (рис. 2а) [8].

Коефіцієнт поширення (spread factor) σ_a адгезивних сил F_a був взятий відповідно до рекомендацій роботи [9] – 4. Це означає, що сила адгезії найбільш слабо зв'язаних частинок приблизно в 4000 разів менша, ніж сила зчеплення сильно зв'язаних частинок. Таким чином, вона поширюється приблизно на три порядки. f , V_g

$$\sigma_a = 4 : \frac{1}{64} \cdot \langle F_a \rangle < F_a < 64 \cdot \langle F_a \rangle$$

Для верифікації моделі ресуспензії в якості зразка було використано графік залежності відносної маси часток, що лишається на прокладці після 1 секунди продуву повітрям із різною швидкістю для аерозолів діаметром 10 та 20 мкм (рис. 2). Як свідчить рис. 2, існує деяка розбіжність між експериментальними даними та розрахунковими, яка може бути зменшена модифікацією RnR моделі ресуспензії або імплементацією інших моделей, які, як було показано раніше, в основі мають той же підхід, проте можуть відрізнятися окремими формулами. Крім того, з рисунків очевидно, що вплив акумуляції резонансної енергії (штрихова лінія) незначний і ним можна знехтувати, особливо при низьких швидкостях потоку (що відповідає умовам під НБК).

a)

б)

Рис. 2. Зразкові графіки залежності ресуспензії від швидкості потоку [5]

Нижче наведені графіки (рис. 3а) залежності рівня ресуспензії від швидкості потоку для CFD імплементації. Порівняння відбувається з розрахунковою кривою на графіках рис. 3б.

Як видно з графіків, відхилення рівня ресуспензії для часток РА 10 мкм при різних швидкостях потоку може сягати 9%, в той час як для часток 20 мкм це значення є вищим (20%). Всі відхилення можна пояснити похибками, які вносяться CFD моделлю та неточністю емпіричних коефіцієнтів.

Варто зауважити, що для моделі НБК та ОУ інтерес представляє поширення часток до 10 мкм, оскільки вони здатні переноситись на значні відстані та потрапляти в дихальні шляхи людей чи

тварин і становлять основну небезпеку. Для часток 10 мкм модель є досить точною, в особливості в зоні малих швидкостей потоку (до 1 м/с).

Висновки. В результаті проведеного моделювання сценарію завантаження відходів в контейнер із виділенням РА можна зробити наступні висновки:

Аналіз приведених в літературі даних дозволив визначити найбільш перспективну моделі ресуспендування, за допомогою якої можливо отримати найбільш точні чисельні прогнози та моделі ресуспендування і розроблено CFD-модель ресуспендування частки в пристінному турбулентному потоці.

а)

б)

Рис. 3. Порівняння залежності ресуспензії часток алюмінію 10 мкм (а) та 20 мкм (б) від швидкості потоку для зразкової моделі та CFD імплементованої

Результати верифікації моделі свідчать про достовірність оцінки вторинного підйому з поверхонь при малих швидкостях потоку (незначних температурних градієнтів повітря).

Якісно результати моделювання співпадають із наведеними в статті [8], проте кількісно існує деяка розбіжність, яка пов'язана із прийнятими в статті припущеннями.

Список літератури:

1. Лагуненко А.С., Хан В.Е., Калиновский А.К. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «укрытие» в условиях нового безопасного конфайнмента в 2017 г. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2018. С. 69–75.
2. Henry C., Minier J. Progress in particle resuspension from rough surfaces by turbulent flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014. P. 1–53.
3. Круковский П.Г., Метель М.А. Анализ и прогнозирование переноса радиоактивной пыли при эксплуатации нового безопасного конфайнмента ЧАЭС. *Використання та спалювання палива, теплоенергетичні установки, екологія*. 2018. С. 69–74.

4. Nasr B., Dhaniyala S. Developments in Surface Contamination and Cleaning: Types of Contamination and Contamination Resources. *Elsevier Inc.* 2016. 192 p.
5. Reeks M.W., Hall D. Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: theory and measurement. *Journal of Aerosol Science*. 2001. P. 1–31.
6. Reeks M.W., Hall D. On the resuspension of small particles by a turbulent flow. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1988. P. 1–9.
7. Vainshtein P., Ziskind G., Fichman M. Kinetic Model of Particle Resuspension By Drag Force. *Physical Review Letters*. 1996. P. 551–554.
8. Stempniewicz M.M., Komen E.M.J. Comparison of several resuspension models against measured data. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. P. 1657–1670.
9. Stempniewicz M. SPECTRA Sophisticated Plant Evaluation Code for Thermal–Hydraulic Response Assessment. *Verification and Validation, NRG report*. 2009. P. 1–13.

References:

1. Lagunenکو, A.S., Khan, V.E., & Kalinovsky, A.K. (2018). Control of the release of radioactive aerosols from the shelter facility under the conditions of a new safe confinement in 2017 [Kontrol' vybrosov radioaktivnykh aerorozley iz ob'yekta «ukrytiye» v usloviyakh novogo bezopasnogo konfaynmenta v 2017 g.]. *Problems of safety of nuclear power plants and Chernobyl*, pp. 69–75.
2. Henry, C., & Minier, J. (2014). Progress in particle resuspension from rough surfaces by turbulent flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, pp. 1–53.
3. Krukovsky, P.G., & Metel, M.A. (2018). Analysis and prediction of transfer of radioactive dust during the operation of the new safe confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant [Analiz y prohnozyrovanye perenosy radyoaktyvnoy pyly pry éksplyuatatsyy novoho bezopasnogo konfaynmenta CHAES]. *Use and burning of fuel, thermal power plants, ecology*, pp. 69–74.
4. Nasr, B., & Dhaniyala, S. (2016). Developments in Surface Contamination and Cleaning: Types of Contamination and Contamination Resources. Elsevier Inc., 192 p.
5. Reeks, M.W., & Hall, D. (2001). Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: theory and measurement. *Journal of Aerosol Science*, 31 p.
6. Reeks, M.W., & Hall, D. (1988). On the resuspension of small particles by a turbulent flow. *Journal of Physics D: Applied Physics*, p. 9.
7. Vainshtein, P., Ziskind, G., & Fichman, M. (1996). Kinetic Model of Particle Resuspension By Drag Force. *Physical Review Letters*, pp. 551–554.
8. Stempniewicz, M.M., & Komen, E.M.J. (2010). Comparison of several resuspension models against measured data. *Nuclear Engineering and Design*, pp. 1657–1670.
9. Stempniewicz, M. (2009). SPECTRA Sophisticated Plant Evaluation Code for Thermal-Hydraulic Response Assessment. *Verification and Validation, NRG report*, pp. 1–13.