

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПИЛЕННЯ РІДИНИ У ОБЛАДНАННІ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

*В статті розглядається високодисперсне розпилення за умови низького тиску та осаджування краплин з мінімальними втратами через випаровування та обладнання для його здійснення. Розроблено процес модифікації поверхонь складних форм за допомогою розпилення рідини у запропонованому обладнанні. Проведено моделювання процесу розпилення рідини з урахування того, що обладнання оснащено вакуумною камерою та спеціальною форсункою для розпилення. Розроблено модель форсунки-розпилювача в ПП SolidWorks. Проведено аналіз потоку рідини, що розпилюється, в ПП FloWorks з урахуванням пониженого тиску в камері пристрою. Показано напрями потоків рідини при розпиленні в вакуумі. Надано рекомендації щодо розташування об'єктів в камері. Моделюванням підтверджено можливість розпилення рідини на поверхню мінералів, причому визначено швидкість руху рідини, що сягає 12,108 м/с, а також визначено, що потік рідини ударає в центрі камери, і лише потім розпилюється в сторони.*

*Ключові слова: модель, розпилення, обладнання для модифікації.*

S.L. HORIASHCHENKO, S.A. KARVAN  
Khmelnitskyi National University

## THE MODELLING OF PROCESSES OF LIQUID SPRAYING EQUIPMENT FOR THE SURFACE MODIFICATION WITH COMPLICATED FORM

*The article considers the superfine spray at the low pressure and deposition of droplets with minimal loss through evaporation and equipment for its implementation. A surface modification process of the complicated shapes by spraying the liquid was elaborated on the basis of the proposed equipment. The simulation process of spraying the liquid was realized and took into account the fact that the equipment is equipped with a vacuum chamber and a special nozzle to spray. The model of spray nozzles is elaborated in SolidWorks. The analysis of fluid flow which is sprayed is carried out in FloWorks considering the reduced pressure in the chamber of the device. The flow of liquid at the spraying in a vacuum was shown. The recommendations on the location of objects in the chamber are given. The modelling confirms the possibility of spraying the liquid on the surface of minerals and result in the determination of the velocity of the liquid which reaches 12.108 m/s. Also it is shown the flow of liquid hits in the center of the chamber and then sprays in the sides.*

*Keywords: model, spray equipment modifications*

### Постановка завдання дослідження

Для сучасного створення нових полімерних композицій існують різноманітні методи, однак, коли мова йде про сорбенти, є складність нанесення рідини на поверхню мінералів, що мають пористу структуру.

Враховуючи те, що пориста структура мінералів має надтонкі капіляри, існує проблема насичення їх активною рідиною. Адже, окрім поверхневого натягу рідини, є сили протидії в самій капілярно-пористій структурі, які обумовлені наявним повітрям. При модифікації таких поверхонь актуальним є питання підвищення ефективності насичення їх рідиною, що піднімає їх адсорбційну спроможність [1, 2].

Актуальною також є вимога енергозбереження: високодисперсне розпилення за умови низького тиску та осаджування краплин з мінімальними втратами через випаровування.

Моделювання таких процесів потребує вирішення низки питань, пов'язаних з силами, що виникають в капілярно-пористій структурі. Як зазначалося вище, на глибину проникнення рідини у структуру мінералу діють сили, що виникають при стисканні повітря в капілярах рідиною, що проникає в них, та сили поверхневого натягу, що перешкоджають рідині ефективно проникати в пори [2, 3].

Для вирішення цих проблем запропоновано проводити модифікацію поверхні сорбенту у вакуумі. Для цього було розроблено модель вакуумного обладнання з можливістю розпилення рідини на поверхні мінералів.

### Результати досліджень та їх обговорення

Відповідно до поставленого завдання нами було спроектовано спеціальне обладнання для розпилення (рис. 1) [1, 2]. Воно складається із резервуара для рідини 1, конусної камери 2, металеві посудини 3, в якій розташовують подрібнений мінерал 7, клапану тиску 4, патрубку 5 та сопла 6. Модель була розроблена у середовищі SolidWorks. Послідовність роботи обладнання наступна: подрібнений на порошок або гранули до 2–10 мм мінерал 7 накладають тонким шаром (10–15 мм) у спеціальну металеву посудину 3. Дана посудина є нижньою частиною пристрою, що являє собою конусну конструкцію з камерою 2, після чого камеру герметизують. Через патрубок 5 до пристрою під'єднують вакуумний насос і починають викачувати повітря. Після досягнення максимуму розрідження в камері 2, відкривають клапан 4, і рідина з резервуару 5 наноситься на частинки мінералу 7. Після нанесення в камері 2 встановлюється атмосферний тиск, і мінерали 7 витримуються у рідині ще 2 хвилини. Після завершення процесу нижню посудину можна від'єднати і вивантажити готовий сорбент. Залишки рідини можуть бути використані повторно.

Для моделювання використовуємо ПП FloWorks, в якому встановимо тиск розрідження у вакуумній

камері 0,01 МПа. На рис.2 представлено типи форсунок, що моделюються. Потік рідини рухається від клапана 4 до низу. Моделювання проводимо з різними розпилювачами, змінивши діаметр вихідного отвору.

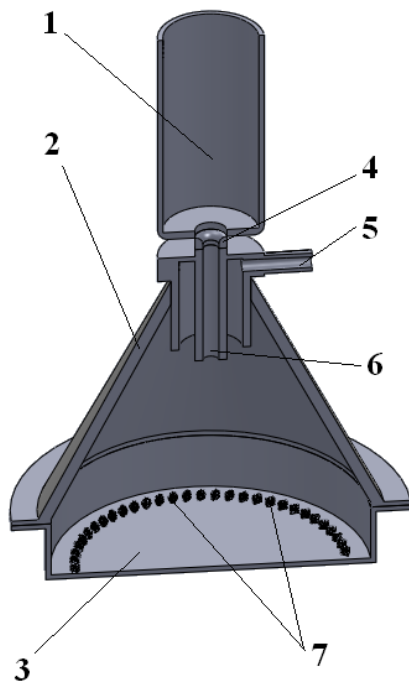


Рис. 1. Модель пристрою для розпилення рідини

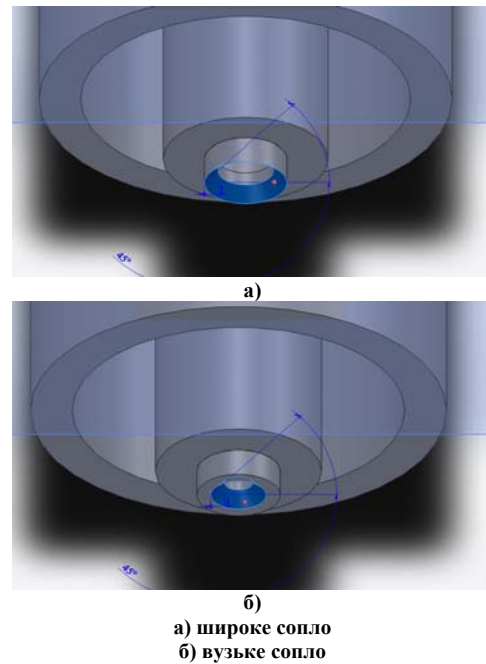


Рис. 2. Форми форсунок для розпилення

Для попереднього моделювання визначено, що при зіткненні з поверхнею зрошення краплина подрібнюється, якщо її кінетична енергія  $E_K = \frac{mV_z^2}{2}$  більша за поверхневу енергію  $E_{II} = \sigma S$ , тобто за умови, що  $E_K \geq E_{II}$  і, відповідно, числа Вебера  $We = \frac{d\rho V_z^2}{\sigma} \geq 12$ , де  $m$  – маса краплини;  $V_z$  – швидкість руху краплини;  $\sigma$  – поверхневий натяг;  $S$  – площа поверхні краплини;  $d$  – діаметр краплини;  $\rho$  – густина рідини.

Розглянемо схему взаємодії краплини під час зіткнення з поверхнею та побудуємо математичну модель руху краплин у факелі розпилювача. Рівняння руху  $i$ -ї краплини, яка вилітає з соплового отвору розпилювача під кутами  $\alpha_j$  і  $\gamma_k$  (рис. 1), у відповідності з законом збереження кількості руху має вигляд:

$$\frac{d(m\vec{V})_{ijk}}{d\tau} = \vec{F}_{ijk} + m_{ijk} \cdot \vec{g}, \tag{1}$$

де  $\vec{F}_{ijk}$  – сила аеродинамічного опору краплини, а  $\frac{dX_{ijk}}{d\tau} = \vec{V}_{ijk}$ .

Коефіцієнт аеродинамічного опору визначається за формулою Л.С. Клячко:

$$C_{ijk} = \frac{24}{Re_{ijk}} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re_{ijk}}}, \tag{2}$$

де  $Re_{ijk} = \frac{\rho_n d_{ijk} |\vec{V} - \vec{U}|_{ijk}}{\mu_n}$  – число Рейнольдса, а динамічний коефіцієнт форми краплини  $\psi_{ijk}$  визначається за формулою:

$$\psi_{ijk} = \exp(0,03 We_{ijk}^{1,5}). \tag{3}$$

де  $We_{ijk} = \frac{\rho_n d_{ijk} |\vec{V} - \vec{U}|_{ijk}^2}{\sigma}$

В нашому випадку в вакуумній камері розпилювача створюється розрідження до 0,01 МПа. Згідно з законом збереження енергії, рівняння тепловіддачі краплини:

$$\frac{d}{d\tau} \theta_{ijk} = -\frac{6}{\rho \cdot C_p \cdot d_{ijk}} \left[ \alpha_{ijk} (\theta_{ijk} - T) + \beta_{ijk} (\rho_n^\theta - \rho_{в.п}) L \right], \quad (4)$$

де коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{ijk} = Nu_{ijk} \frac{\lambda_{п}}{d_{ijk}}$ , а  $Nu_{ijk} = 2 + 0,55 Re_{ijk}^{0,5} Pr^{0,33}$  – число Нуссельта,  $Pr = \frac{\mu_{п} C_{pп}}{\lambda_{п}}$  –

число Прандтля.

Також у рівняннях введено позначення:  $\rho_n^\theta$ ,  $C_p$ ,  $C_{pп}$  – питома теплоємність рідини та пару;  $L$  – теплота пароутворення;  $\mu_{п}$  – динамічна в'язкість водяної пари;  $\lambda_{п}$  – теплопровідність водяної пари;  $D_{п}$  – дифузія водяної пари у повітрі;  $i, j, k$  – індекси, що відносяться до краплини  $i$ -го діаметру, яка вилітає під кутами  $\beta_j$  і  $\gamma_k$ . Початкові умови:

$$\tau = 0, d_{ijk} = d_{ijk0}, \theta_{ijk} = \theta_0.$$

$$V_{x\,ijk0} = \left| \vec{V}_0 \right| \sin \alpha_j \cos \gamma_k + U_{обпр},$$

$$V_{y\,ijk0} = \left| \vec{V}_0 \right| \sin \alpha_j \sin \gamma_k,$$

$$V_{z\,ijk0} = \left| \vec{V}_0 \right| \cos \alpha_j = 0,$$

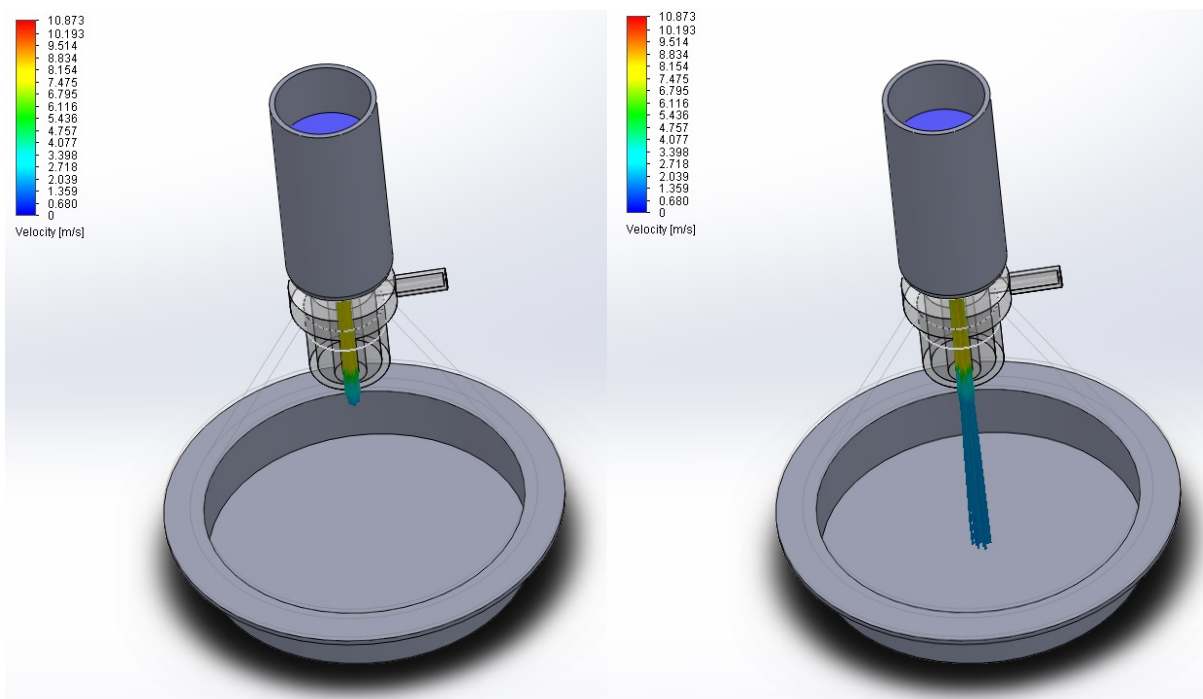


Рис. 3. Початок розпилення в змодельованому обладнанні

Як видно з цього етапу моделювання, потік рідини рухається стрімким потоком зі швидкістю 12,108 м/с. Як показали варіанти моделювання з форсунками різних діаметрів, вони лише впливають на швидкість потоку, а не на форму, оскільки потік рідини не взаємодіє з повітрям, яке змушувало б рідину більш ширше розпилюватись. Однак застосування найбільшого отвору дозволяє подати в камеру більшу кількість рідини. Як показує подальше моделювання, рідина, рухаючись з великою швидкістю вниз, вдаряється о дно камери і розбризкується в сторони (рис.4). Подібне повторено для розпилювача з малим отвором (рис.5).

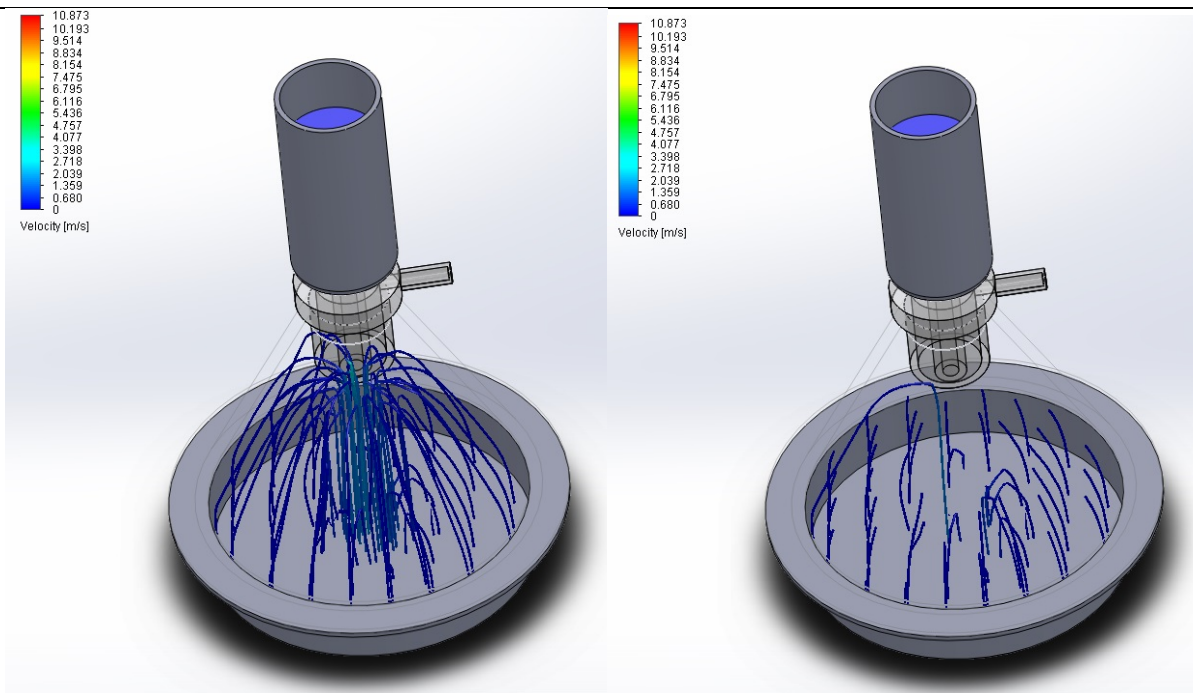


Рис. 4. Процес розпилення рідини відбитої від дна пристрою та розтягнуте розрідженим тиском

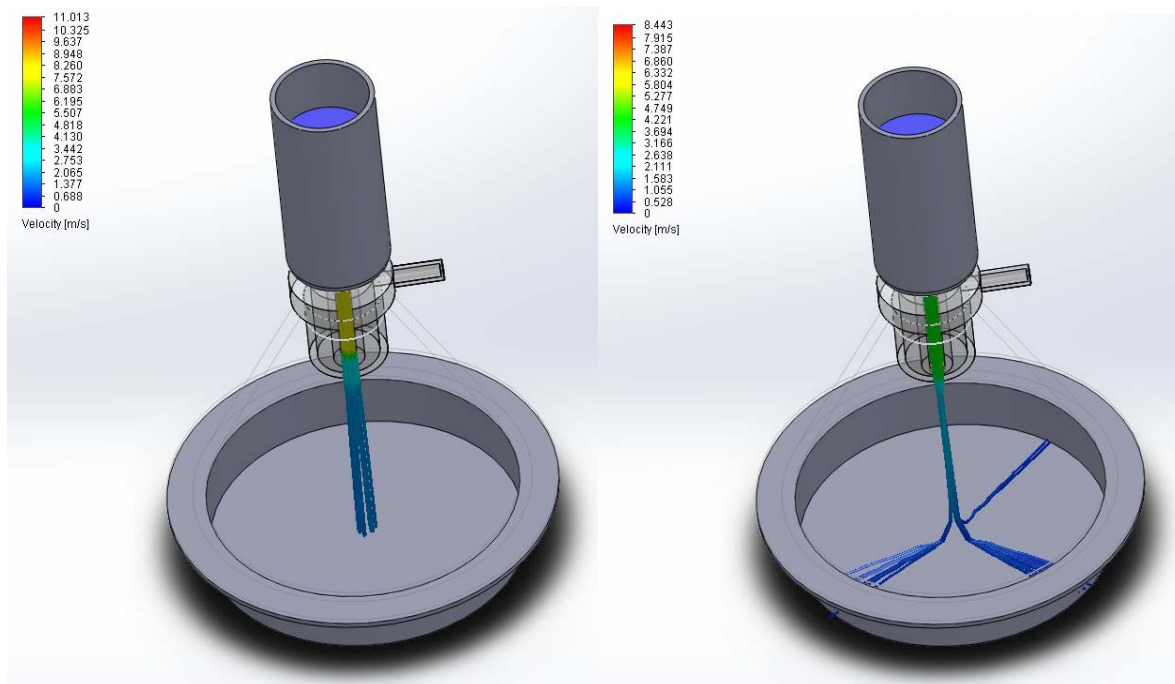


Рис. 5. Моделювання розпилення з вузьким розпилювачем

Розпилення рідини (рис.5 та рис.6) при малому отворі проходить інтенсивно, але швидкості знаходяться в межах 4–8 м/с. При повторному моделюванні з більшим отвором (рис. 7) спостерігаємо значно більшу швидкість руху рідини до 12,108 м/с.

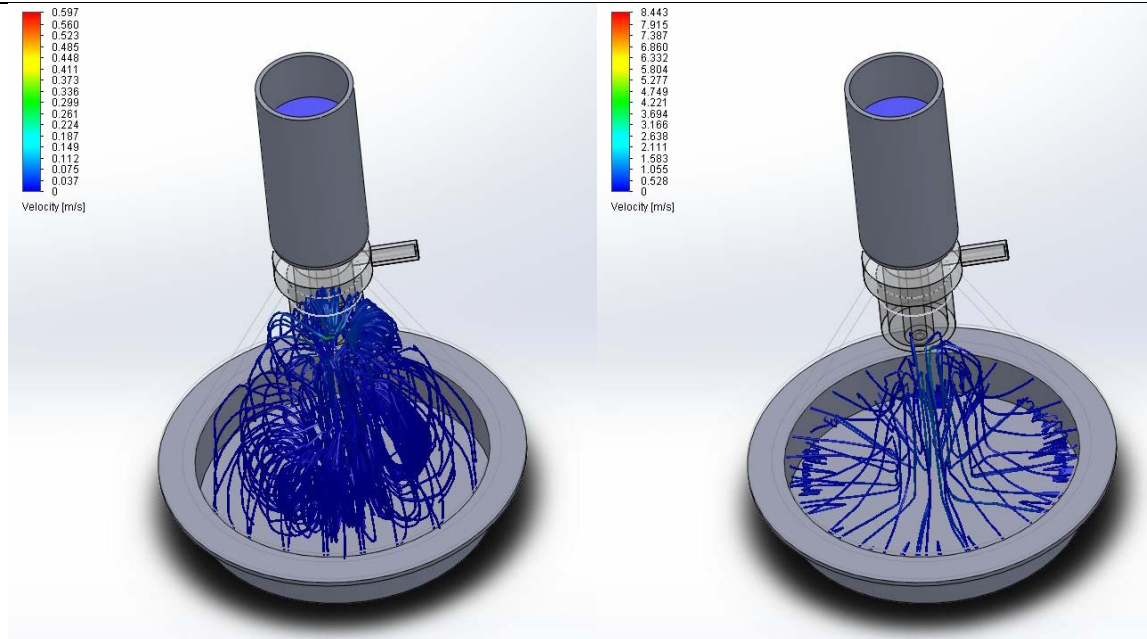


Рис. 6. Моделювання розпилення рідини після зіткнення з поверхнею дна

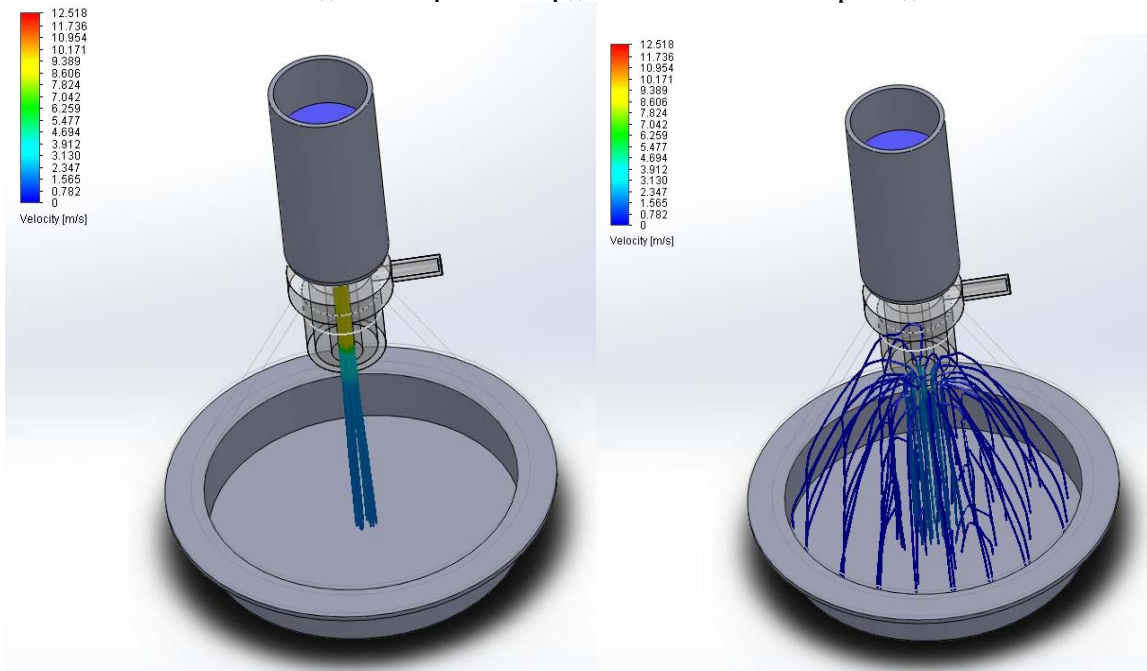


Рис. 7. Моделювання розпилення з великим отвором

### Висновки

Математичним моделюванням підтверджено можливість розпилення рідини на поверхню мінералів, причому визначено швидкість руху рідини, що сягає 12,108 м/с, а також визначено, що потік рідини ударяє в центрі камери, і лише потім розпилюється в сторони. Таким чином, можна передбачити розташування мінералів вздовж краю камери. Це підвище ефективність покриття їх рідиною з усіх сторін.

### Література

1. Svitlana Karvan, Serhiy Horyashchenko, Olga Paraska. Development of equipment and technology for spray coating and functionalization of textile materials. International R&D brokerage event in textiles and clothing, Bursa, Turkey, 4-5 April 2013, p. 324–326.
2. Horyashchenko S. Modeling and research of polymer coating on clothing materials, 10th Joint International Conference Clotech-2012, Warsaw, Poland, 20-21 September 2012, p.151–159.
3. Horiashchenko S. Experimental research drop size in polymers sprayed onto textile materials. Interdisciplinary Intergation of Science in Technology, Education and Economy. Monograph: edited by Shalapko J. and Zoltowski B. 2013. p. 402–408.