

МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РОЗПИЛЮВАЧА

Анотація. В статті розглядається модель розпилювача, що оснащена ультразвуковим концентратором для подрібнення рідини (розплаву полімеру). Проведено аналіз ультразвукової дії на потік рідини з урахуванням його розпилення в повітрі. Наведені математичні моделі залежності довжини хвилі від амплітуди та фізичних складових полімеру. Розроблена модель показала рух кавітаційних елементів вздовж лінії розпилення та дозволила визначити швидкість руху потоку та масу краплин, що утворюються.

Ключові слова: полімерні покриття, пристрої для нанесення, моделювання

S. HORIASHCHENKO, S. KARVAN

Khmelnyskyi National University

MODELING THE ULTRASONIC SPRAYER

Abstract. The article considers the model of a sprayer equipped with an ultrasonic concentrator for grinding a liquid (molten polymer). An analysis of the ultrasonic effect on the fluid flow has been carried out, taking into account its spraying in the air. The mathematical models of the dependence of wave length on amplitude and physical components of a polymer are given. The developed model showed the motion of cavitation elements along the line of spraying and allowed to determine the velocity of the flow and the mass of the resulting droplets.

Keywords: polymer coatings, devices for coating, modeling

Вступ

При всьому різноманітті існуючих підходів, питання інтенсифікації процесів технології нанесення покриттів найбільш ефективно вирішуються за рахунок використання нових видів енергії і високоєфективного підведення енергії до взаємодіє речовин. Багаторічні дослідження [1-4] показали, що одним з перспективних напрямів створення нових і інтенсифікації існуючих процесів хімічних і суміжних технологій є використання енергії ультразвукових (УЗ) коливань високої інтенсивності. На сьогоднішній день основною проблемою застосування ультразвукового впливу є низька ефективність більшості процесів, особливо необхідних для виробництв, що пред'являють підвищені вимоги до характеристик кінцевого продукту, оскільки немає наукових основ для оптимізації режимів ультразвукового впливу в залежності від широкого діапазону властивостей і характеристик оброблюваних середовищ.

При цьому, експериментальні дослідження скрутні, тому найбільш доцільним підходом до оптимізації ультразвукового впливу на технологічні середовища є використання методів математичного моделювання.

Основна частина

Незважаючи на все різноманіття процесів, що здійснюються під дією УЗ коливань, можна виділити загальні підходи до розгляду УЗ впливу на різні середовища. Загальна модель ультразвукового пристрою для розпилення речовин на різні технологічні об'єкти була розроблена та змодельована, представлена на рис.1. Згідно представленої моделі, УЗ вплив здійснюється наступним чином. Випромінювач здійснює безпосереднє введення механічних коливань УЗ частоти в активне середовище з метою зміни структури і властивостей матеріалу активного середовища за рахунок різних фізичних ефектів, як правило, обумовлених наявністю гетерогенних включень в оброблюваній середовищі (кавітаційних зародків або дисперсних частинок твердої або рідкої фази). У рідині під впливом потужних УЗ коливань виникає кавітація, яка супроводжується періодичними ударними хвилями при захопленні кавітаційних бульбашок. Ударні хвилі приводять до руйнування водневих зв'язків (процес деполімеризації), диспергуванню твердих наночастинок в рідині, а також прискоренню за рахунок руйнування молекулярних зв'язків хімічних реакцій синтезу різних полімерів і отримання з природних полімерів цінних низькомолекулярних речовин [1,5], інтенсифікації процесів розчинення і екстрагування [1]. Створюване звуковий тиск в газовому середовищі, що містить частинки дрібнодисперсної фази, призводить до коагуляції цих частинок.

Активне середовище, як правило, обмежена пасивним середовищем (тверде тіло або газ, що межує з вільною поверхнею рідини). Наявність пасивної середовища може обумовлювати ряд фізичних ефектів на кордоні «активна-пасивна середовище», пов'язаних з особливостями агрегатного стану активного середовища. Зокрема, під впливом ударних хвиль при захопленні кавітаційних бульбашок в активній рідкому середовищі відбувається виникнення капілярних хвиль на поверхні рідини, що межує з пасивної газовим середовищем, які збільшують поверхню розділу фаз, тим самим прискорюючи процес абсорбції газів рідинами. В тонких шарах рідини (до 2 мм) поверхневі фізичні ефекти проявляються найбільш інтенсивно, оскільки ударна хвиля проходить малі відстані, зберігши достатньо велику амплітуду тиску (кілька десятків атмосфер) на кордоні розділу активне-пасивне середовище. Через великі амплітуд тиску ударної хвилі відбувається значне зростання амплітуди капілярних хвиль, яке призводить до розпаду гребню хвилі на окремі краплі, викликаючи тим самим розпилення рідини [1-3,7]. Залежно від виду активної і

пасивної середовищ основні процеси, що реалізуються і інтенсифікуються за допомогою УЗ коливань, можна розділити на чотири основні підгрупи: процеси в середовищах «рідина-тверде тіло» (рідке активне середовище і тверде пасивне), «рідина-газ», «газ-тверде тіло», «тверде тіло-тверде тіло» (обробка, зварювання, різання і т. д.).

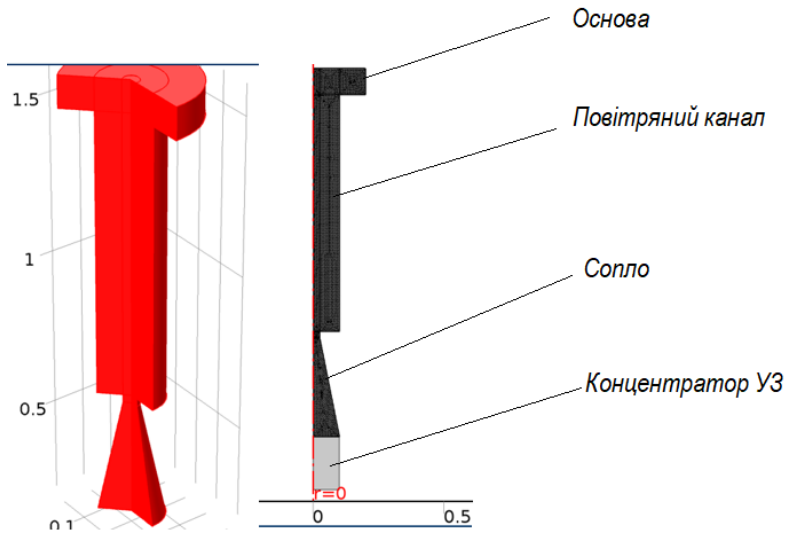


Рисунок 1 – Модель ультразвукового нанесення покриттів

В роботі розглядаються фізичні процеси в активних газових і рідких середовищах, які найменш вивчені в аспекті нанесення покриттів.

Запропонований підхід до оптимізації полягає в дослідженні випромінювання, поширення коливань і їх взаємодії з гетерогенними включеннями в активному середовищі, а також відображення і перетворення енергії коливань на кордоні активного і пасивного середовища. Останній етап полягає у визначенні критеріїв оптимальності процесів в залежності від інтенсивності виникають фізичних ефектів, розглянутих на попередніх етапах. З огляду на відмінності агрегатного стану активної і пасивної середовищ необхідно детальне математичного опис кожного процесу в рамках даного підходу.

Ультразвукові коливання в активних рідких середовищах зважаючи на високий хвильовий опір рідин мають більшу інтенсивність. Тому вони викликають розширення і захопання гетерогенних складових - кавітаційних бульбашок з утворенням ударних хвиль, які здійснюють вплив на молекулярному рівні для реалізації процесів деполімеризації, диспергування, емульгування і ін. Технологічні процеси в рідких середовищах проходять головним чином в режимі розвиненою кавітації [1]. Пасивна середовище, тобто стінки технологічного об'єкта, призводить до відбиття коливань, тим самим реалізуючи режим стоячих хвиль. При цьому відображають явища призводять до більш рівномірного розподілу розвинених кавітаційних зон, на відміну від необмежених об'єктів, де вся кавітаційна хмара зосереджена поблизу випромінювача, таким чином, ефективність кавітаційної обробки підвищується.

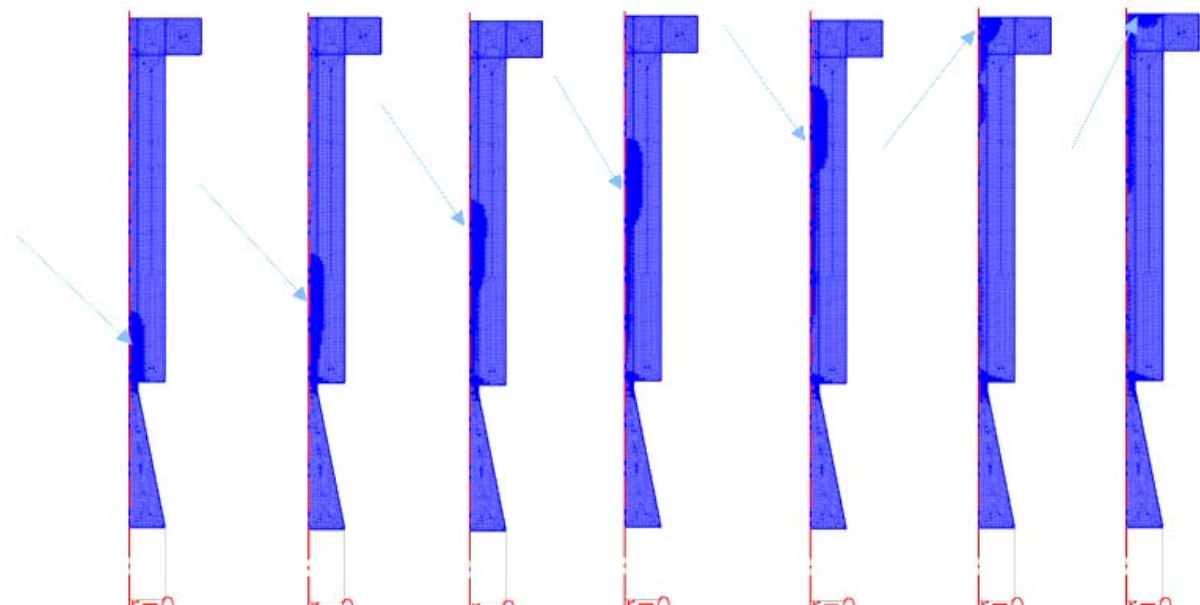


Рисунок 2 – Моделювання руху потоку бульбашок вздовж лінії розплення

Розроблена модель максимізації розвинутою кавітаційної області вперше враховує вплив в'язкості рідини, притому що залежить від швидкості деформації, на інтенсивність кавітації.

Моделювання ультразвукового впливу на активне рідке середовище, що обмежене пасивним твердим середовищем показано на рисунку 2. Стрілкою показано рух кавітаційної бульбашки.

На першому етапі виявляється інтенсивність впливу, достатня для досягнення режиму розвинутою кавітації. З використанням запропонованої моделі в'язких рідин проведена оптимізація інтенсивностей впливу при частоті акустичних коливань, що дорівнює 22 кГц, найбільш часто використовувана в сучасних ультразвукових апаратах [1]. Отримані результати показали, що чисельні показники інтенсивності, при якій в рідкому середовищі настає «розвинений» кавітаційний процес, залежать головним чином від в'язкості рідини, наприклад, для води і спирту дане значення становить не більше 5 Вт / см², для рідин в діапазоні в'язкості 80 ... 100 сПЗ - 6..8 Вт / см², а для високов'язких рідин (більш 400 сПЗ) - більше 25 Вт / см².

Для оптимізації процесів в рідких середовищах, обмежених пасивною газовим середовищем, необхідна розробка моделі, що дозволяє визначити профіль утворених капілярних хвиль в залежності від тиску ударної хвилі, що виникає при схлопуванні кавітаційних бульбашок. Щоб визначити ступінь розвиненості кавітації і тиск ударної хвилі, необхідно використовувати розроблену модель і отримані залежності для оптимізації ультразвукових технологічних процесів в рідких середовищах, обмежених твердими пасивними середовищами. Для довжини капілярної хвилі і її амплітуди A є наступні вирази [7]:

$$(\omega - i\beta)^2 \rho \left(1 - \frac{\lambda^2 \rho (i\omega + \beta)}{8\pi^2 \mu} \right) \frac{\lambda}{2\pi} - 4(i\omega + \beta) \frac{2\pi}{\lambda} \left(-1 + \frac{\lambda^2 \rho (i\omega + \beta)}{4\pi^2 \mu} \right) = -i\sigma \frac{\rho(\omega - i\beta)}{2\mu},$$

де μ - в'язкість, ρ - щільність рідини, σ - поверхневий натяг, β - декремент загасання.

Представлена модель дозволить визначити основні критерії оптимальності процесів абсорбції (кратність збільшення поверхні розділу фаз) і розпилення, продуктивність і діаметр крапель в залежності від властивостей оброблюваних середовищ.

Кратність збільшення поверхні розділу фаз α при абсорбції можливо оцінити на підставі наступного отриманого виразу в залежності від довжини і амплітуди капілярної хвилі:

$$\alpha = \frac{\int_0^{\frac{\lambda}{2}} 8x \partial x \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi A}{\lambda} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right)}}{\lambda^2} \approx \frac{4A}{\pi \lambda} \left[\int_0^{\pi} s \sin(s) \partial s \right] = \frac{4A}{\lambda}$$

Відповідно до отриманої висловом встановлено, що ультразвукова дія дозволить збільшити поверхню розділу фаз і, отже, прискорити процес абсорбції до 3-х разів. Для профілю капілярної хвилі отримано такий вираз з урахуванням обурення 2-го порядку:

$$\xi(x, t) \approx A \sin(\omega t) \left(\cos(kx) - \left(\frac{Ak}{3} \cos(2kx) + 2Ak \right) \cos(\omega t) \right)$$

Середній діаметр крапель визначається середньою товщиною гребню капілярної хвилі на основі теорії розпаду струменів Релея:

$$D = 3,78 \frac{\int_0^{\frac{\lambda}{2}} \left(\xi(x) - \xi\left(\frac{\lambda}{2}\right) \right) \partial x}{\xi(0) - \xi\left(\frac{\lambda}{2}\right)}$$

Для продуктивності розпилення отримано такий вираз:

$$\Pi = aVfN_s = aVfN_s = a \frac{\lambda^2 A}{2\pi} \left(\frac{\pi^2}{2} - 2 \right) fN_s$$

де N_s – кількість капілярних хвиль на одиниці площі поверхні, яке приймається рівною кількості кавітаційних бульбашок, f - частота коливань робочого інструмента, a - поправочний коефіцієнт, що означає частку обсягу капілярної хвилі, що розпадається на краплі, V – об'єм рідини, що розпилюється.

Результати моделювання

Сам процес був змодельований з урахування розпилення полімерної рідини в повітрі на плоску деталь. На рис.3 представлено розрахунки визначення швидкості розпилення, а на рис.4 – визначення маси краплин, що розпилюються.

Моделювання утворення та руху частинок полімеру показано на рис.5. Видно, як відбувається розширення потоку полімеру та його взаємодія з оточуючим середовищем.

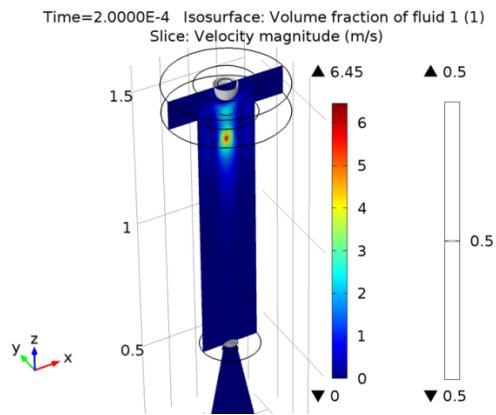


Рисунок 3 – Визначення швидкості розпилення краплин

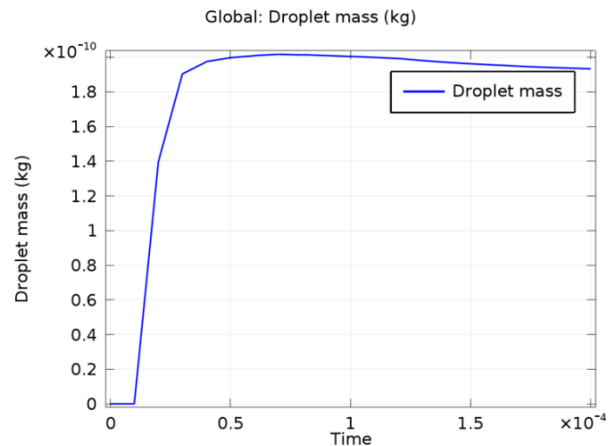


Рисунок 4 – Визначення маси краплин

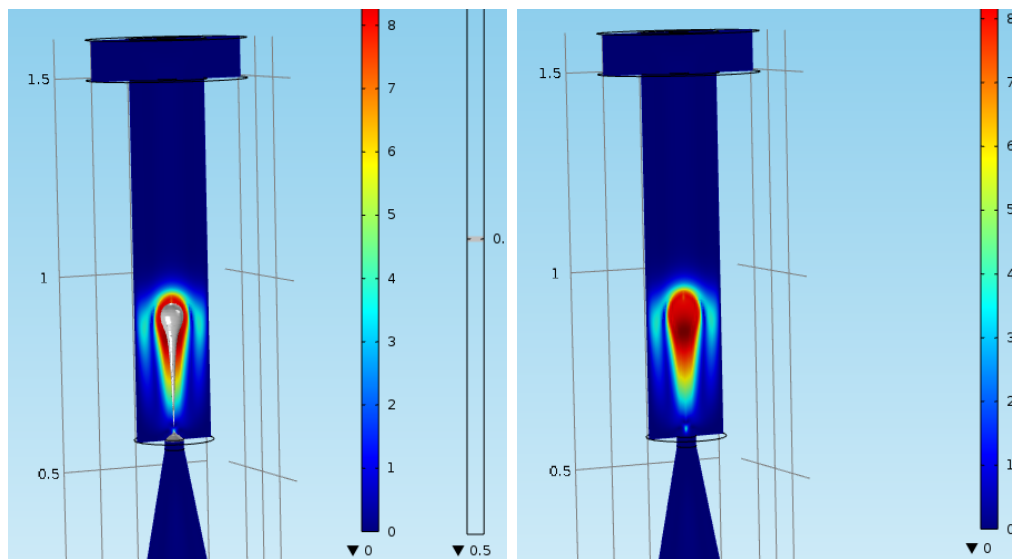


Рисунок 5 – Утворення краплини полімеру та її рух

Висновки

Згідно з отриманими результатами оптимальними параметрами розроблюваного обладнання будуть:

- створюваний рівень звукового тиску в газодисперсному середовищі не менше 120 дБ;
- діапазон оптимальних частот ультразвукового впливу від 50 до 80 кГц в залежності від типу і властивостей полімеру, що розпилюється.

В результаті аналізу фізичного механізму взаємодії в різних середовищах були встановлені режими акустичного впливу, що забезпечують реалізацію з максимальною ефективністю (продуктивністю) для процесів, що відбуваються під час розпилення полімерної рідини ультразвуковим розпилювачем. Отримано значення краплин рідини.

Література

1. Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [Текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 414 с.
2. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.
3. Sheng, C.D. Modelling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method [Текст] / C.D. Sheng, X.L. Shen // Journal of Aerosol Science. – 2006. – Issue 37. – P. 16–36.
4. Vytautas Ostasevicius, Vytautas Jurenas, Rimvydas Gaidys, Ievgeniia Golinka/ Vibroacoustic handling and levitation of microparticles in air/ JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. Dec 2017, Vol. 15. ISSN 2345-0533 h/100-105
5. Serhiy Horyashchenko, Ievgeniia Golinka. Simulation of particle flow of the polymer droplets using ultrasonic spraying / 22th International Scientific Conference: Mechanika 2017 – Proceedings. Kaunas. P.134-137.
6. Горященко С.Л. Моделивання краплин при розпиленні двофазного потоку соплом. Вісник ХНУ,

т.3, 2016, с 282-285

7. Numerical study on the effect of nozzle pressure and yarn delivery speed on the fiber motion in the nozzle of Murata vortex spinning/ *Journal of Fluids and Structures* 27 (2011) 121–133.

References

1. Khmelev, V.N. Ul'trazvukovыe mnohofunktsional'nyе y spetsyalizirovannыe apparaty dlya yntensyfykatsyy tekhnolohycheskykh protsessov v promyshlennosty, sel'skom y domashnem khozyaystve [Tekst] / V.N. Khmelev, H.V. Leonov, R.V. Barsukov, S.N. Tsyhanok, A.V. Shalunov. – Alt. hos. tekhn. un-t, BTY. – Byysk: Yzd-vo Alt. hos. tekhn. un-ta, 2007. – 414 s.
2. Khmelev, V.N. Prymenenye ul'trazvuka vysokoy yntensyvnostry v promyshlennosty / V.N. Khmelev, A.N. Slyvyn, R.V. Barsukov, S.N. Tsyhanok, A.V. Shalunov; Alt. hos. tekhn. un-t, BTY. – Byysk: Yzd-vo Alt. hos. tekhn. un-ta, 2010. – 203 s.
3. Sheng, C.D. Modelling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method [Tekst] / C.D. Sheng, X.L. Shen // *Journal of Aerosol Science*. – 2006. – Issue 37. – P. 16–36.
4. Vytautas Ostasevicius, Vytautas Jurenas, Rimvydas Gaidys, Ievgeniia Golinka/ Vibroacoustic handling and levitation of microparticles in air/ *JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA*. Dec 2017, Vol. 15. ISSN 2345-0533 h/100-105
5. Serhiy Horyashchenko, Ievgeniia Golinka. Simulation of particle flow of the polymer droplets using ultrasonic spraying / 22th International Scientific Conference: *Mechanika 2017 – Proceedings*. Kaunas. P.134-137
6. S.L. Horyashchenko Modelyuvannya kraplyn pry rozpylenni dvofaznoho potoku soplom. *Visnyk KhNU*, t.3, 2016, s 282-285
7. Numerical study on the effect of nozzle pressure and yarn delivery speed on the fiber motion in the nozzle of Murata vortex spinning/ *Journal of Fluids and Structures* 27 (2011) 121–133.

Рецензія/Peer review : 22.11.2017 р.

Надрукована/Printed :08.02.2018 р.

Рецензент: стаття рецензована редакційною колегією