

УДК 621.647.23

Луговський О.Ф. д.т.н., проф., Ляшок А.В. м.н.с., Гришко І.А. к.т.н., асис.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РОЗПИЛЕННЯ В ТОНКОМУ ШАРІ В КАМЕРУ З НАДЛИШКОВИМ ТИСКОМ

Lugovskoj A., Ljashok A., Grishko I.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([Alichka\\_lav@ukr.net](mailto:Alichka_lav@ukr.net))

### OF ULTRASOUND LIQUID SPRAYING IN A THIN LAYER

*Розглянуто особливості процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі в камеру з надлишковим тиском. Експериментально доведено, що при зміні тиску в замкненій камері розмір розпиленого рідинного аерозолу не змінюється, що підтверджує аналітичну залежність розрахунку діаметру краплинки. Представлено два випадки розміщення ультразвукового диспергатора в камері з надлишковим тиском. Експериментально та аналітично доведено, що продуктивність процесу ультразвукового розпилення зменшується за лінійним законом при збільшенні тиску в камері. Розглянуті особливості процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі при розміщенні диспергатора повністю в камері з надлишковим тиском та при його частковому розміщенні в камері.*

*Ключові слова: ультразвукове розпилення, тонкий шар рідини, ультразвуковий диспергатор, дисперсність, надлишковий тиск, замкнена камера.*

#### Вступ

Існує багато технологічних процесів, які вимагають створення сучасних автоматизованих мехатронних систем для розпилення рідини в замкнену камеру. Окремі процеси вимагають при цьому розпилення в камеру з нормальним тиском. Так, наприклад, в медичному приладобудуванні при створенні камер штучного мікроклімату для догляду за хворими та слабкими виникає потреба насичення замкненого об'єму аерозолем ліків з дисперсністю 0,5...5 мкм. При цьому впорскування або випаровування аерозолу в об'єм не припустимо, оскільки треба підтримувати постійний тиск і температуру [1-3]. Деякі ж технологічні процеси вимагають розпилювати рідину в камеру з надлишковим тиском. Наприклад, в двигунах внутрішнього згорання, теплогенераторах та ін. Окрім подолання проблеми впроскування паливно-повітряної суміші в двигунах внутрішнього згорання в камеру з надлишковим тиском необхідно ще й враховувати діапазон розкиду діаметрів крапель аерозолу, бо ефективність роботи двигуна внутрішнього згорання суттєво залежить від якості підготовки паливно-повітряної суміші, яка, в свою чергу, повинна мати дисперсність 50...150 мкм при карбюраторній системі та 15...60 мкм при точковій або розподіленій системі впроскування палива за допомогою електромагнітних форсунок [4-6].

Для підвищення ефективності застосування ультразвукового розпилення в тонкому шарі в багатьох технологічних процесах різних галузей виробництва необхідно дослідити поведінку, характеристики та параметри процесу розпилення в камеру з надлишковим тиском.

**Метою** статті є висвітлення особливостей процесу ультразвукового розпилення рідини в тонкому шарі в камеру з надлишковим тиском.

#### Основна частина

Перш за все було з'ясовано залежність дисперсності аерозолу від надлишкового тиску в камері, куди відбувається розпилення. Для цього було спроектовано та виготовлено експериментальний стенд, який складається з герметичної камери 1, ультразвукового розпилювача 2, ємності з водою, системи керування та компресора (рис. 1).

В якості рідини для розпилення був обраний нагрітий до температури плавлення (64° С) сплав Вуда. Це дозволило забезпечити можливість оптичного дослідження розмірів краплинок аерозолу сплава після їх потрапляння в ємність з водою та охолодження.



Рис. 1. Експериментальний стенд для дослідження розміру аерозолі в камері з надлишковим тиском

Диспергатор разом з резервуаром було розміщено в герметичній камері, в якій за допомогою компресора створювався надлишковий тиск. При цьому тиск діяв на всю зовнішню поверхню диспергатора, здійснюючи додаткове статичне поздовжнє навантаження. Після досягнення необхідного тиску вмикалася система керування і починався процес розпилення. Диспергатор збуджувався на резонансній частоті 22 кГц.

По закінченню розпилення та осідання всього аерозолі в ємність з водою краплинки аерозолі збиралися та досліджувалися під мікроскопом (рис. 2).

Результати дослідження (рис. 3) свідчать, що діаметр крапель при ультразвуковому розпиленні в тонкому шарі не змінюється при збільшенні тиску в камері, куди відбувається розпилення. Домінують краплі з діаметром 35 мкм як при нормальному тиску, так і при його збільшенні.

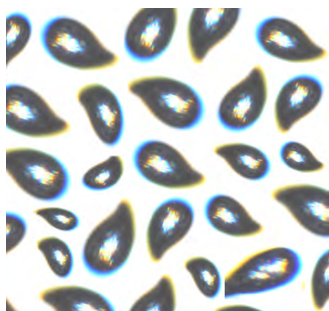


Рис. 2. Фото краплинок аерозолі сплаву Вуда під мікроскопом

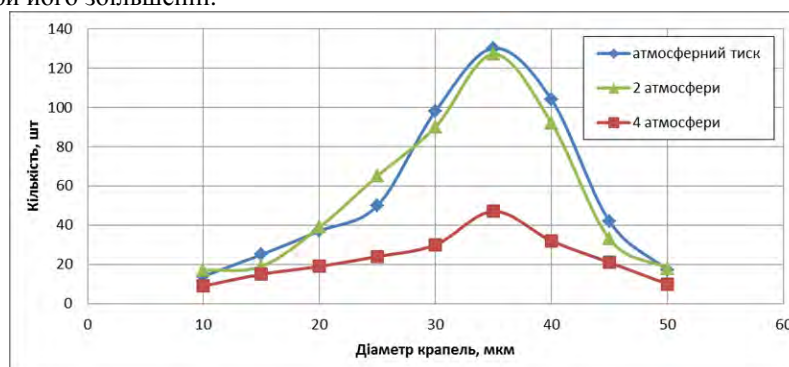


Рис. 3. Графік розподілення діаметрів крапель в залежності від зміни тиску

Отримані результати експериментально підтверджують аналітичну залежність для визначення діаметру крапель аерозолі при ультразвуковому розпиленні [2]

$$d_k = \alpha \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\rho f_k^2}},$$

де  $d_k$  – дисперсність аерозолі;  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання звукової енергії в'язким теплопровідним середовищем,  $\alpha \approx 0,3$ ;  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, що розпилюється;  $\rho$  – густина рідини;  $f$  – частота акустичних коливань.

Однією із важливих умов створення мехатронної системи є продуктивність. При дослідженні продуктивності процесу ультразвукового розпилення в замкнену камеру ультразвуковий диспергатор конструктивно може бути розміщений в камері повністю або тільки частково, наприклад, ступенем меншого діаметра ступінчастого трансформатора коливальної швидкості, на торці якого знаходиться поверхня розпилення [7].

Як відомо, процес ультразвукового розпилення починається з утворення капілярних хвиль, властивості яких істотно залежать від сили поверхневого натягу. Капілярні хвилі відрізняються малою амплітудою і малою довжиною. Через малість амплітуди можна знехтувати впливом сили тяжіння. За формою ці хвилі нагадують синусоїду. Що стосується механізму їх утворення, то він досить простий. Під дією тих чи інших зовнішніх впливів поверхня рідини в деякому місці «вдавлюється», тобто стає увігнутою (рис. 4а).

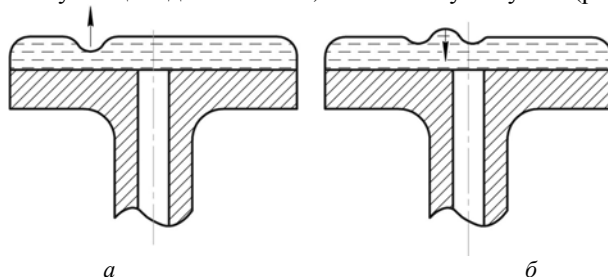


Рис. 4. Механізм утворення капілярних хвиль (а – увігнута поверхня рідини; б – випукла поверхня рідини)

Тиск на шар рідини під цією увігнутою поверхнею стає менший (на величину  $\frac{\sigma}{r}$ ), ніж тиск у сусідніх шарах, де поверхня залишається плоскою. Різниця тисків, яка виникла таким чином, змушує рідину з сусідніх шарів приливати під увігнуту поверхню і рідина знову піднімається до початкового рівня, але проходить його за інерцією за рахунок накопиченої кінетичної енергії. Внаслідок цього поверхня в цьому місці стане випуклою і сила тиску, обумовлена кривизною поверхні, буде тепер спрямована в низ (рис. 4б). Зрозуміло, що такого роду коливання рідини в одному місці змусять і сусідні точки здійснювати такі ж коливання. Це і означатиме, що явище має хвильовий характер. Умова на поверхні рідини визначається різницею тисків з обох сторін цієї поверхні і рахується за формулою Лапласа [8], яка має вигляд

$$p - p_0 = -\alpha_{к.л.} \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

де  $p$  – тиск в рідині поблизу поверхні;  $p_0$  – постійний зовнішній тиск;  $\alpha_{к.л.}$  – капілярна постійна;  $\xi$  –  $z$  – координата точок поверхні рідини.

З формули видно, що при збільшенні  $p_0$ , умови для підйому капілярної хвилі будуть змінюватись і тиск, який буде діяти на капілярну хвилю, буде заважати їй підійматися, відповідно на здійснення процесу відривання краплини, тобто на повне підйомання капілярної хвилі та її руйнування буде витрачатися більше енергії.

Для експериментального підтвердження було виготовлено спеціальний стенд, в якому ультразвуковий диспергатор конструктивно повністю розміщувався в камері з надлишковим тиском (рис. 5).

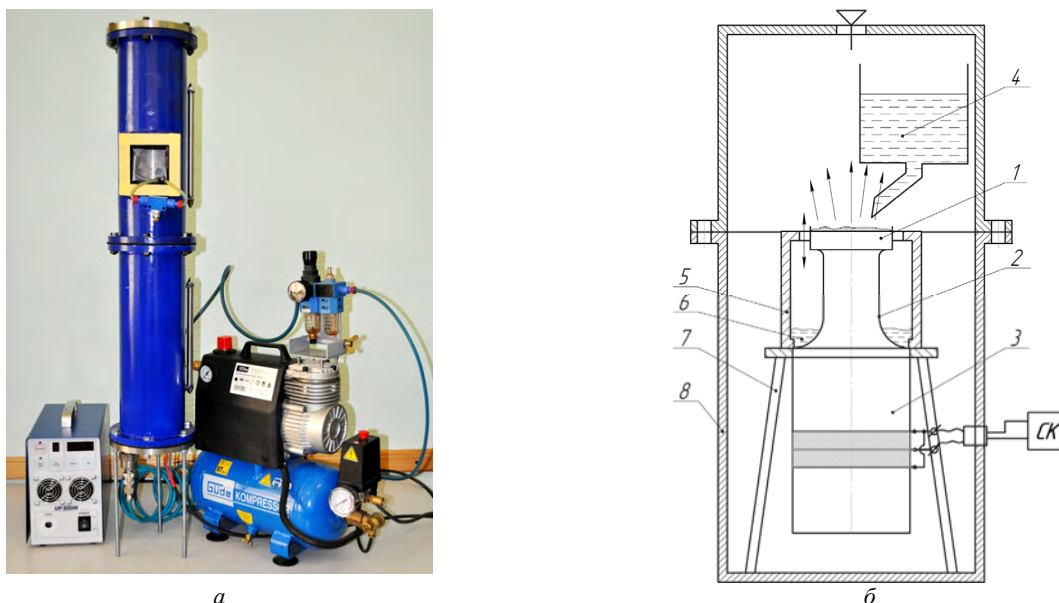


Рис. 5. Експериментальний стенд (а) для дослідження продуктивності процесу розпилення в камеру з надлишковим тиском та його схема (б) (1 – вібруюча поверхня; 2 – трансформатор коливальної швидкості; 3 – диспергатор; 4 – об'єм рідини, що подається; 5 – резервуар для рідини, яка переливається; 6 – об'єм рідини, яка переливається; 7 – підставка для підтримки диспергатора; 8 – герметична камера; СК – система керування)

В експериментах в якості рідини використовувалися вода та спирт (рис. 6). Дослідження проводилися на резонансній частоті диспергатора 22 кГц при підведеній потужності 50 Вт. Додатково досліджувався сплав Вуда (рис. 7), однак підведена потужність при цьому була збільшена до 350 Вт, оскільки поверхневий натяг сплаву значно відрізняється від відповідних показників води та спирту.

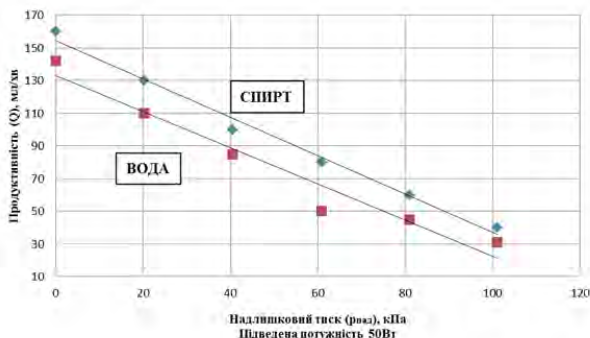


Рис. 6. Графік залежності продуктивності від надлишкового тиску для спирту та води

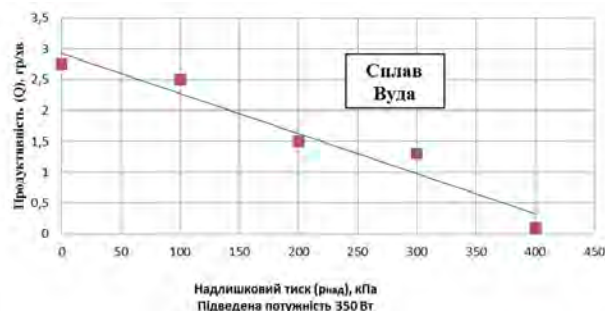


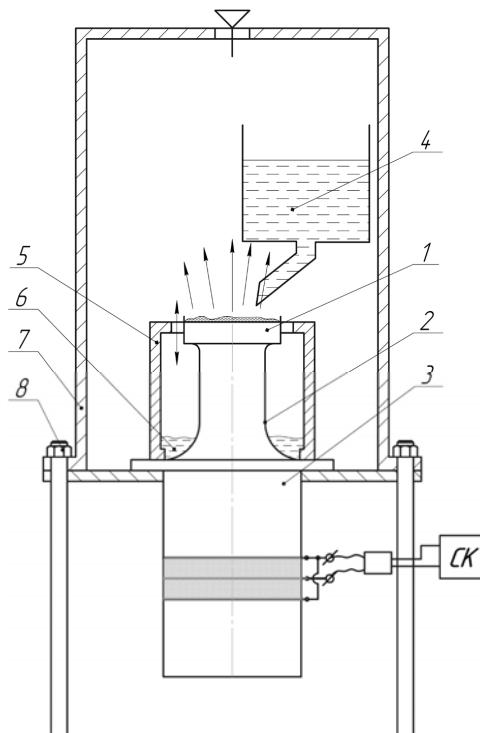
Рис. 7. Графік залежності продуктивності від надлишкового тиску для сплаву Вуда

З графіків видно, що при збільшенні надлишкового тиску в камері продуктивність процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі падає за лінійною залежністю. Це закономірно, якщо розглядати формулу капілярної хвилі (1). До тих пір, поки постійний зовнішній тиск  $p_0$  (у нашому випадку надлишковий тиск у камері) не буде перевищувати тиск  $p$  в рідині поблизу поверхні (у нашому випадку ультразвуковий тиск), процес розпилення буде відбуватися. При невиконанні цієї умови процес розпилення припиняється оскільки тиск буде заважати капілярній хвилі підійматися.

При подальшому дослідженні впливу надлишкового тиску на продуктивність процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі було змінено умови експерименту. В камеру з надлишковим тиском розміщували не весь диспергатор, а тільки його розпилюючу поверхню, тобто ступінь меншого діаметра трансформатора коливальної швидкості (рис. 8).



а



б

Рис. 8. Експериментальний стенд для дослідження продуктивності отримання аерозолі при надлишковому тиску в камері, де в замкненому об'ємі знаходиться тільки розпилююча поверхня диспергатора та його схема (1 – вібруюча поверхня; 2 – трансформатор коливальної швидкості; 3 – диспергатор; 4 – об'єм рідини, що подається; 5 – резервуар для рідини, яка переливається; 6 – об'єм рідини, яка переливається; 7 – герметична камера; 8 – підставка для підтримки диспергатора; СК – система керування)

Для дослідження в якості рідини використовувалися вода та спирт (рис. 9). Дослідження проводилися на резонансній частоті диспергатора 22 кГц при підведеній потужності 50 Вт.

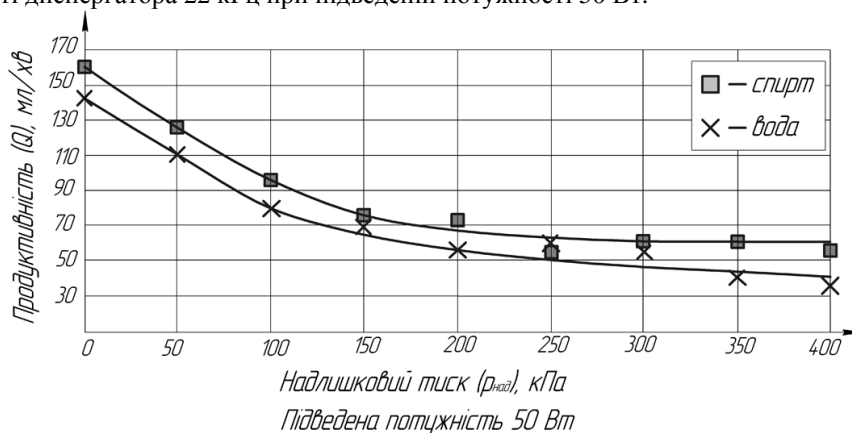


Рис. 9. Графік залежності продуктивності від надлишкового тиску для спирту та води, для випадку розміщення в замкненому об'ємі тільки розпилюючої поверхні диспергатора

Доцільним є порівняти продуктивності процесу ультразвукового розпилення в камеру з надлишковим тиском при різних способах розміщення ультразвукового диспергатора (рис. 10)

У першому випадку (рис. 10а) тиск рівномірно діє на весь диспергатор, стискаючи його. Це негативно впливає на процес ультразвукового розпилення, адже для його реалізації необхідна системі керування прикласти надлишкове зусилля, щоб подолати додаткове навантаження і все ж таки утворити капілярну хвилю, з якої відірветься краплинка аерозолі. Такі умови призводять до поступового зменшення продуктивності розпилення, оскільки підведена потужність згідно умов експерименту залишається незмінною.

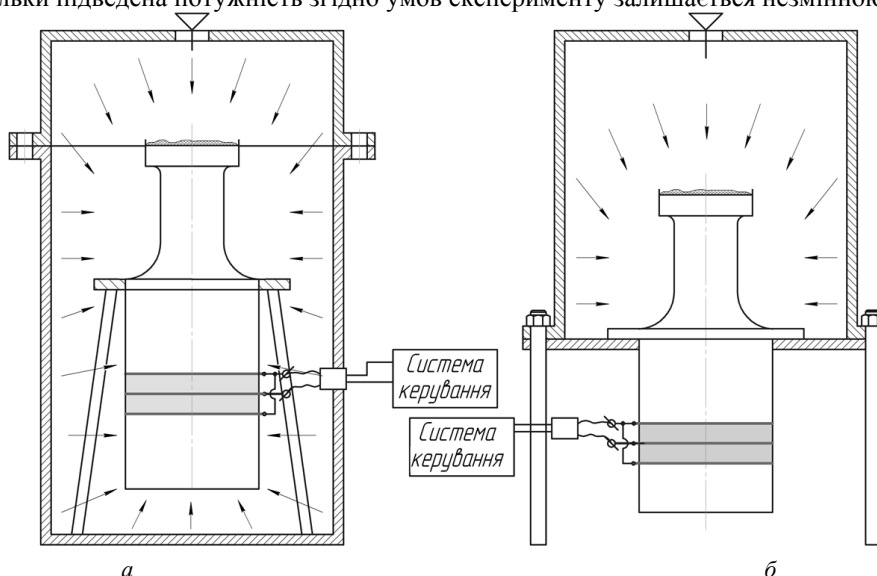


Рис. 10. Схеми експериментальних стендів для дослідження продуктивності отримання аерозолі при надлишковому тиску в камері (а – диспергатор знаходиться повністю в замкненому об'ємі; б – тільки розпилююча поверхня диспергатора знаходиться в замкненому об'ємі)

У другому випадку (рис. 10б) майже весь диспергатор знаходиться поза межами замкненої камери і тиск діє тільки на ступінь малого діаметра трансформатора коливальної швидкості. При таких умовах п'єзоелектричний перетворювач буде менш навантаженим і для реалізації процесу ультразвукового розпилення системі керування знадобиться менша потужність, тобто такий випадок навантаження буде менше впливати на продуктивність процесу розпилення, що і підтверджується результатами експериментальних досліджень, зведених у графіки на (рис. 11).

З графіків видно, що у першому випадку ультразвукове розпилення відбувається тільки до 100 кПа, а далі при збільшенні тиску ми маємо майже однакову продуктивність. При цьому спостерігається просто розбрикування рідини крупними краплями, тобто відбувається суто кавітаційне диспергування рідини без утворення капілярних хвиль. Таке явище можна пояснити тим, що до тих пір, поки виконуються умови формули (1), функціонує механізм «капілярно-хвильового» розпилення, на виході якого ми маємо дрібнодисперсний аерозоль. Коли надлишковий тиск перевищує ультразвуковий і у диспергатора не вистачає



потужності підтримувати капілярну хвилю, то відбувається «кавітаційний» механізм розпилення. Тобто з поверхні рідини відриваються великі за розміром краплі рідини, які просто летять у різні боки.

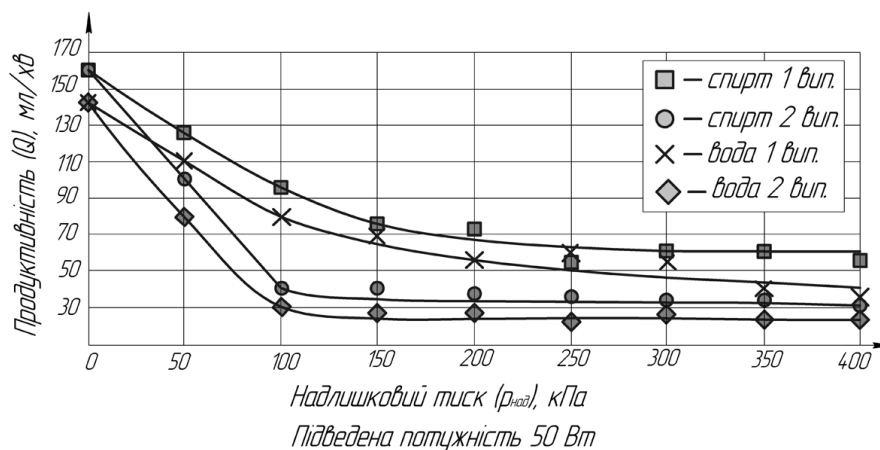


Рис. 11. Порівняльні графіки залежності продуктивності від надлишкового тиску для спирту та води для двох випадків розміщення диспергатора

Слід звернути увагу і на те, що в формулу числа кавітації теж входить тиск [22]

$$\chi = \frac{P_{н.с.} - P_H}{p_a}$$

де  $P_{н.с.}$  – тиск навколишнього середовища;  $P_H$  – тиск насиченого пару  $p_a$  – амплітуда звукового тиску.

Виходячи з цього, «кавітаційний» механізм розпилення теж залежить від зовнішнього тиску і при збільшенні індексу кавітації кавітаційний механізм розпилення стає основним.

Що ж стосується ультразвукового розпилення рідини у випадку, коли в камері з надлишковим тиском знаходиться тільки розпилююча поверхня, то продуктивність отримання дрібнодисперсного аерозолу тут теж зменшується зі збільшенням тиску. Однак спад продуктивності процесу розпилення відбувається більш поступово і до того моменту поки виконуватимуться умови формули (1).

Отже, в усіх розглянутих випадках продуктивність процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі в камері з надлишковим тиском залежить від рівня цього тиску.

### Висновки

Експериментально доведено, що при ультразвуковому розпиленні в камеру з надлишковим тиском дисперсність аерозолу не залежить від тиску. При розпиленні розплаву сплаву Вуда при резонансній частоті 22 кГц не залежно від рівня тиску в камері отримана дисперсність 35 мкм. Обґрунтовано та експериментально доведено, що при збільшенні тиску в камері, куди відбувається ультразвукове розпилення, продуктивність зменшується за лінійним законом, що підтверджує результати аналітичного дослідження. Приведена порівняльна характеристика залежності продуктивності процесу ультразвукового розпилення від надлишкового тиску для різних умов розташування диспергатора. Встановлено, що при розташуванні диспергатора повністю в камері з надлишковим тиском, процес розпилення відбувається до того моменту поки виконуються умови формули капілярної хвилі, тобто до 100 кПа. А при розташуванні в камері з надлишковим тиском тільки розпилюючої поверхні процес розпилення відбувається інтенсивніше і продуктивність падає поступово, відповідаючи лінійному закону.

**Анотація.** Рассмотрены особенности процесса ультразвукового распыления в тонком слое в камере с избыточным давлением. Экспериментально доказано, что при изменении давления в замкнутой камере размер распыленного жидкостного аэрозоля не меняется, что подтверждает аналитическую зависимость расчета диаметра капельки. Представлены два случая размещения ультразвукового диспергатора в камере с избыточным давлением. Экспериментально и аналитически доказано, что производительность процесса ультразвукового распыления уменьшается по линейному закону при увеличении давления в камере. Рассмотрены особенности процесса ультразвукового распыления в тонком слое при размещении диспергатора полностью в камере с избыточными давлением и при его частичном размещении в камере.

**Ключевые слова:** ультразвуковое распыление, тонкий слой жидкости, ультразвуковой диспергатор, дисперсность, избыточное давление, замкнутая камера.

**Abstract.** *The features of ultrasonic spraying process in a thin layer in the pressurized chamber. Experimentally proved that at the change of pressure in the chamber the size of the nebulized liquid aerosol does not change, that confirms analytical dependence of calculation of diameter of drop. Two cases are presented placing an ultrasonic disperser chamber pressurized. Experimentally and analytically proved that the performance of the ultrasonic spraying process decreases linearly with increasing chamber pressure. The features of ultrasonic atomization process in a thin layer during placement of the dispersant in a fully pressurized chamber and its placement in the partial chamber.*

**Keywords:** *ultrasonic spraying, a thin layer of liquid, ultrasonic dispersing agent, dispersion, overpressure, closed chamber.*

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. *Васильев С.Н.* Двигатели внутреннего сгорания / С.Н. Васильев. – М.: Машиностроение, – 1995. – Т.1. – 290с.
2. *Хмелев В.Н.* Ультразвуковое распыление жидкостей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 250 с.
3. *Луговской А.Ф.* Ультразвуковое распыление в системах подготовки топливно-воздушной смеси / А.Ф. Луговской // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. – Кіровоград, 2000. – Вип. 7. – С. 30 – 33.
4. *Луговський О.Ф.* Отримання дрібнодисперсного аерозолу шляхом ультразвукового диспергування / О.Ф. Луговський // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Серия машиностроение. – Киев. – 1999. – Вип. 34. – С. 193–202.
5. *Луговской А.Ф.* Применение пьезоэлектрических преобразователей как путь совершенствования систем подготовки и подачи топлива в ДВС / А.Ф. Луговской // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Серия машиностроение. – Киев. – 1997. – Вып. 32. – С. 34–38.
6. *Луговской А.Ф.* Системы подготовки топливно-воздушной смеси с ультразвуковыми диспергаторами / А.Ф. Луговской // Праці Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва". – Севастополь, 1998. – Том III. – С. 293–299.
7. *Ляшок А.В.* Експериментальне дослідження процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі в камеру з надлишковим тиском / А.В. Ляшок., А.В. Мовчанюк, О.Ф. Луговський // Матеріали конференції XIV Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивна гідравліка і пневматика" – Одеса, 2013. – С. 31 – 32.
8. *Ландау Л.Д.* Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – 736 с.

#### References

1. *Vasil'ev S.N.* Dvigateli vnutrennego sgoranija (The engine combustion vnutrenneho). Moscow: Mashinostroenie, 1995, T.1., 290p.
2. *Hmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova A.V.* Ul'trazvukovoe raspylenie zhidkostej: monografija (Ultrasonic atomization of liquids: Monograph). Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tehn. un-ta, 2010, 250 p.
3. *Lugovskoj A.F.* Ul'trazvukovoe raspylenie v sistemah podgotovki toplivno-vozdushnoj smesi [Getting a fine aerosol by ultrasonic dispersion]. Tehnika v sil'skogospodars'komu virobniectvi, galuzeve mashinobuduvannja, avtomatizacija. Zbirnik naukovih prac' Kirovograds'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. Kirovograd, 2000, no 7, pp. 30 – 33.
4. *Lugovs'kij O.F.* Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI», 1999, no 34, pp. 193 – 202.
5. *Lugovskoj A.F.* Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI», 1997, no 32, pp. 34 – 38.
6. *Lugovskoj A.F.* Sistemy podgotovki toplivno-vozdushnoj smesi s ul'trazvukovymi dispepgatopami [Training system of the fuel-air mixture ul'trazvukovymi dispepgatopami]. Ppaci Mizhnapodnoi naukovu-tehnicnoi konfepencii "Ppogpesivna tehnika i tehnologija mashinobuduvannja, ppiladobuduvannja i zvapjuval'nogo vipobniectva". Sevastopol', 1998, Tom III, pp. 293–299.
7. *Ljashok A.V., Movchanjuk A.V., Lugovs'kij O.F.* Eksperimental'ne doslidzhennja procesu ul'trazvukovogo rozpilennja v tonkomu shari v kameru z nadlishkovim tiskom [Experimental study of ultrasonic atomization process in a thin layer in a chamber with overpressure]. Materiali konferencii HIV Mizhnarodnoi naukovu-tehnicnoi konferencii "Progresivna gidravlika i pnevmatika". Odesa, 2013. pp. 31 – 32
8. *Landau L.D., Lifshic E.M.* Teoreticheskaja fizika (Theoretical Physics). Uchebnoe posobie. V 10 t. T. VI. Gidrodinamika. – 3-e izd., pererab. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz-mat. lit., 1986, 736 p.

Подана до редакції 30.05.2014