

Ляшок А. В.

Національний
технічний
університет
України
"Київський
політехнічний
інститут"

УДК 621.647.23

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГАТОРА ДЛЯ РОЗПИЛЕННЯ В ТОНКОМУ ШАРІ

Представлена методика расчета конструктивных параметров ультразвукового диспергатора для распыления жидкости в тонком слое, размещенном на нормально вибрирующей торцевой поверхности трансформатора колебательной скорости. Рассмотрен случай подвода акустической энергии со стороны жидкости. Экспериментально подтвержден факт образования на поверхности вибрирующей жидкости капиллярных волн. Полученные параметры капиллярных волн подтверждают адекватность известных аналитических зависимостей. Представленная методика учитывает заданные дисперсность аэрозоля, производительность распыления и массу конструктивных элементов поверхности распыления.

The design procedure of design data ultrasonic dispergator for dispersion of a liquid in the thin layer placed on properly vibrating face surface of the transformer of oscillatory speed is presented. The case of a supply of acoustic energy from a liquid is considered. The fact of formation on a surface of a vibrating liquid of capillary waves is experimentally confirmed. The received parameters of capillary waves confirm adequacy of known analytical dependences. The presented method takes into account given the dispersion of an aerosol spray performance and weight of constructive elements of the surface of the spray.

Багато технологічних процесів реалізуються із використанням рідинного аерозолю. Перш за все, це широке коло технологічних процесів в машинобудуванні, двигунобудуванні, приладобудуванні, радіоелектроніці, хімічній промисловості, медицині та сільському господарстві [1]. Так, наприклад, в радіоелектроніці дрібнодисперсний аерозоль необхідний для нанесення паяльних флюсів при автоматичному виготовленні друкованих плат, покритті напівпровідникових пластин фоточутливим шаром на стадії фотолітографії, при виготовленні напівпровідникових схем та в багатьох технологічних процесах [2].

В сільському господарстві дрібнодисперсний аерозоль необхідний при створенні сучасних тепличних комплексів з мехатронними системами підтримки штучного мікроклімату [3,4].

В медицині дрібнодисперсний аерозоль широко застосовують, наприклад, в пульмонології для лікування дихальних шляхів

аерозолем, виготовленим із застосуванням лікарських рослин та медичних препаратів. А також в медичному приладобудуванні при створенні камер штучного мікроклімату для догляду за хворими та слабкими, коли виникає потреба насичення замкнутого об'єму аерозолем ліків з малою дисперсністю [5].

Всі ці технологічні процеси потребують аерозоль з дисперсністю меншою за 30 мкм. Така дисперсність може бути досягнута при ультразвуковому розпиленні рідини в тонкому шарі.

В цьому випадку розпилення рідини, відбувається за рахунок введення ультразвукових коливань в тонкий шар рідини, що призводить до виникнення, так званого, кавітаційно-хвильового механізму розпилення [6], згідно якого утворення дрібнодисперсних крапель аерозолю відбувається при руйнуванні гребенів стоячих капілярних хвиль кінцевої амплітуди, що утворюються на вібруючій поверхні рідини (рис. 1).

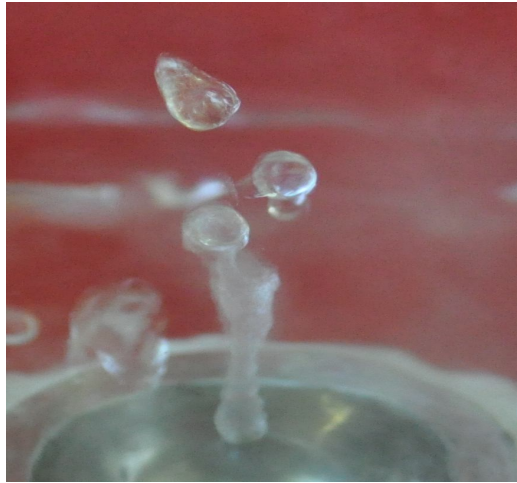
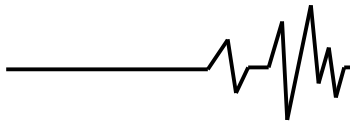


Рис. 1. Руйнування капілярної хвилі з відриванням краплин

При цьому, згідно ефекту Фарадея [7] частота, виникаючих на поверхні рідини, капілярних хвиль вдвічі менша за частоту збуджуючих ультразвукових коливань, що підводяться нормально до шару рідини.

Процес ультразвукового розпилення в тонкому шарі реалізується за допомогою технологічного обладнання – диспергаторів, конструктивними параметрами яких можна забезпечити необхідну продуктивність та дисперсність аерозолі.

Відомі інженерні методики [8, 9] дозволяють розрахувати акустичні розміри п'єзоелектричних приводів повздовжніх коливань, що є основою вказаного технологічного обладнання. Але значний вплив на параметри аерозолі, що отримується, оказує віброюча поверхня розпилення, для розрахунку якої відсутня інженерна методика.

Метою статті є створення інженерної методики розрахунку конструктивних параметрів поверхні розпилення ультразвукових диспергаторів, що реалізують спосіб розпилення в тонкому шарі з підведенням акустичної енергії з боку рідини.

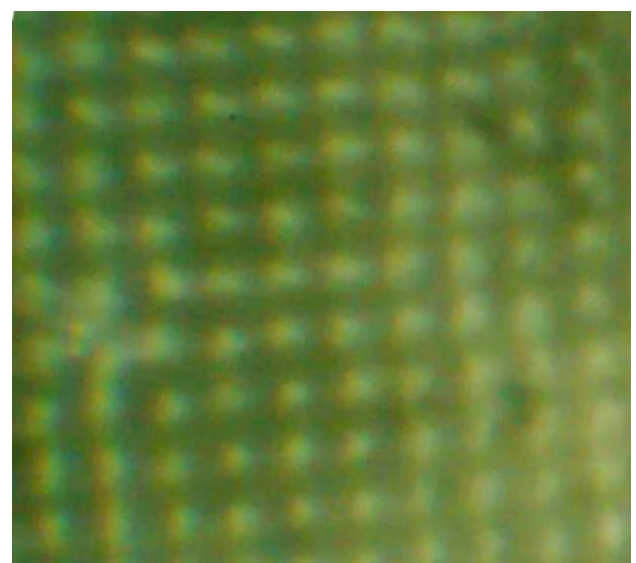
Довжину капілярних хвиль, що виникають на поверхні тонкого шару рідини, який вкриває віброючу поверхню диспергатора, рекомендують розраховувати за формулою [10]:

$$\lambda_k = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}}, \quad (1)$$

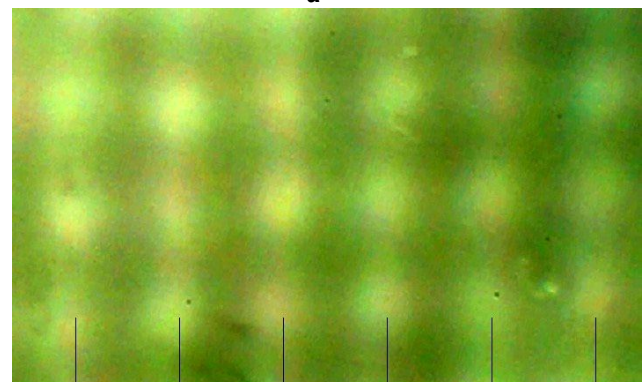
де σ – коефіцієнт поверхневого натяг рідини, що розпилюється; ρ – густина рідини; f – частота акустичних коливань.

Для перевірки справедливості наведеної формули було проведено експериментальне дослідження процесу утворення капілярних хвиль, в результаті якого на вимірювальному мікроскопі були отримані фронтальні фотографії розміщення капілярних хвиль на віброючій поверхні.

Дослідження підтвердило факт утворення капілярних хвиль на поверхні тонкого шару рідини, що знаходиться на нормально віброючій поверхні диспергатора (рис. 2), підтвердило регулярність капілярних хвиль за умовами стабільності товщини шару рідини та частоти збудження, а також дозволило виміряти реальну довжину капілярних хвиль.



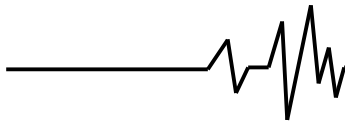
а



б

Рис. 2. Розташування капілярних хвиль на віброючій поверхні: а – збільшення в 24 рази; б – збільшення в 35 разів

Отримані результати свідчать про те, що використовуючи формулу (1), отримуємо похибку в 4...6 %.



Реалізація способу ультразвукового розпилення рідини в тонкому шарі відбувається за допомогою спеціальних ультразвукових диспергаторів (рис. 3), в яких за рахунок застосування трансформаторів коливальної швидкості забезпечується досягнення необхідної амплітуди коливань [8, 10, 11].

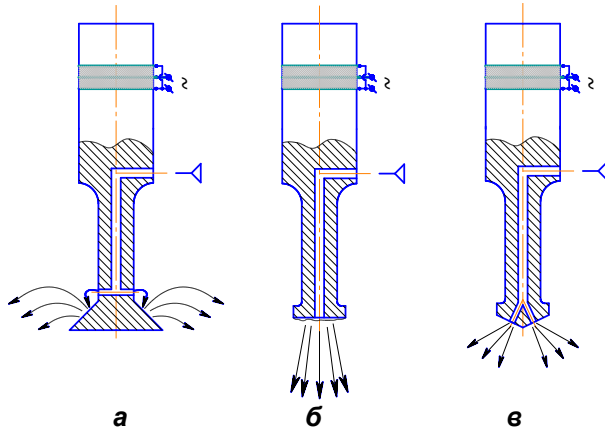


Рис. 3. Схема реалізації ультразвукового розпилення в тонкому шарі з утворенням факелів різної форми: а – парасольковий факел; б – розширений факел; в – стиснутий факел

Для отримання високоякісного аерозолю при максимальній продуктивності диспергатора необхідно забезпечити повне покриття віброуючої поверхні шаром рідини та забезпечити стабільність його товщини. Зміною кута нахилу поверхні розпилення можна досягти зменшення паразитної коагуляції аерозолю в факелі, що забезпечить звуження меж розкиду діаметрів крапель аерозолю (рис. 3)

Існуючі методики розрахунку ультразвукових резонансних приводів різних акустичних схем [8] дозволяють розраховувати поздовжні розміри складових частин приводів. Для розрахунку поверхні розпилення диспергатора необхідно задати тип рідини, середній діаметр d_k краплі аерозолю та бажану продуктивність Q диспергатора.

Згідно дослідженим закономірностям процесу ультразвукового розпилення [10] між середнім діаметром крапель аерозолю d_k та довжиною капілярної хвилі λ_k на поверхні шару рідини існує кореляція.

$$d_k = \alpha \lambda_k, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт поглинання звукової енергії в'язким теплопровідним середовищем, $\alpha \approx 0,3$

Тоді середній діаметр краплі аерозолю, який пов'язаний з реологічними особливостями рідини, що розпилюється, та частотою капілярних коливань, буде визначено залежністю

$$d_k = \alpha^3 \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\rho f_k^2}}. \quad (3)$$

Або частота акустичних коливань, при якій забезпечується бажана дисперсність аерозолю визначається залежністю

$$f_k = \sqrt{\frac{\alpha^3 8\pi\sigma}{d_k^3 \rho}}. \quad (4)$$

У відповідності до ефекту Фарадея [7] необхідна резонансна частота f збудження акустичної системи диспергатора визначається

$$\text{як } f = 2f_k.$$

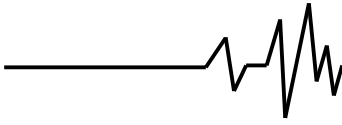
Виходячи з цього, акустичні розміри складових частин диспергатора, залучаючи відомі методики, потрібно розрахувати з урахуванням резонансної частоти

$$f_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8\alpha^3 8\pi\sigma}{d_k^3 \rho}}. \quad (5)$$

Спираючись на хвильову гіпотезу ультразвукового розпилення [12,13], припустимо, що з утворенням гребеня стоячої хвилі кінцевої амплітуди від нього обов'язково відокремиться одна крапля аерозолю постійного діаметру, рівного d_k . У такому випадку на протязі певного проміжку часу, що дорівнює $0,5T_k$ (T_k - період коливань капілярної хвилі), на площі S , яка знаходиться за співвідношенням $S = \lambda_k^2$ утворяться дві впадини і два гребеня, і отже, утвориться дві краплі аерозолю. У наступний проміжок часу $0,5T_k$ впадини і гребені поміняються місцями і знову утворяться дві краплі аерозолю.

Таким чином, за період T_k з площі S буде розпилено об'єм рідини:

$$V_S = \frac{8}{3} \pi d_k^3. \quad (6)$$



Тоді витрата рідини при ультразвуковому розпиленні з площі S може бути визначена залежністю

$$Q_S = \frac{V_S}{T_k} \quad (7)$$

або

$$Q_S = V_S f_k \quad (8)$$

Враховуючи загальну продуктивність Q диспергатора, можна визначити необхідну кількість площин S на поверхні розпилення, що вкрита тонким шаром рідини:

$$n_S = \frac{Q}{Q_S}, \quad (9)$$

тобто площа поверхні розпилення становитиме:

$$S_{pn} = n_S S. \quad (10)$$

В разі виконання поверхні розпилення плоскою, що дозволяє отримати щільний вузький факел аерозолі (рис. 4) [8], діаметр поверхні розпилення d_{pn} диспергатора становитиме:

$$d_{pn} = 2\sqrt{\frac{S_{pn}}{\pi}} \quad (11)$$

або з урахуванням співвідношень (1), (5), (6), (8)-(10):

$$d_{pn} = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}} \cdot \sqrt{\frac{3Q}{d_k^3 \sqrt{\frac{8\alpha^3 \pi\sigma}{d_k^3 \rho}}}} \quad (12)$$



Рис. 4. Вузький щільний факел аерозолі при ультразвуковому розпиленні

Якщо ж поверхня розпилення диспергатора виконана конусною, що дозволяє отримати розширений факел аерозолі (рис. 5) [8], її розміри пов'язані залежністю:

$$d_{pn} = \frac{2S_{pn}}{\pi h}, \quad (13)$$

де h – висота конусності поверхні розпилення. Або з урахуванням співвідношень (1), (5), (6), (8)-(10):

$$d_{pn} = \frac{3Q \sqrt{\left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}\right)^2}}{2\pi^2 h d_k^2 \sqrt{\frac{8\alpha^3 \pi\sigma}{d_k^3 \rho}}}. \quad (14)$$



Рис. 5. Розширений факел аерозолі при ультразвуковому розпиленні

В разі виконання поверхні розпилення у вигляді зворотного конуса з метою отримання парасолькового факелу аерозолі (рис. 6) [8], розміри поверхні визначаються залежністю:

$$S_{pn} = \frac{\pi}{2} \left[\frac{1}{2} (d_{pn}^2 + d_{mp.u.}^2) + (d_{pn} + d_{mp.u.}) \cdot l \right], \quad (15)$$

де $d_{mp.u.}$ – діаметр ступені малої площі трансформатора коливальної швидкості; l – довжина бокової поверхні конуса.

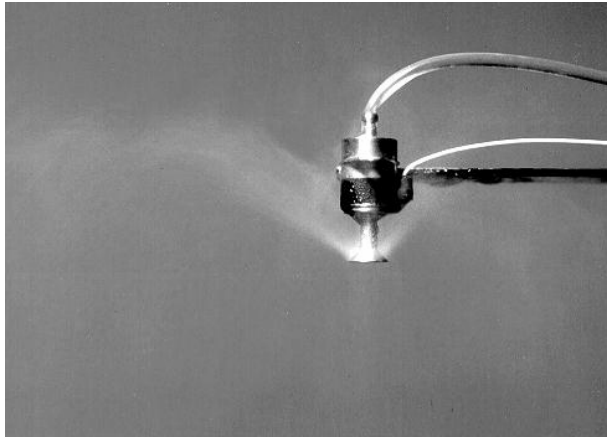
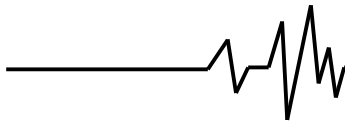


Рис. 6. Парасольковий факел аерозолю при ультразвуковому розпиленні

Подача рідини на розпилюючу поверхню може здійснюватися різними способами [8]. Найбільш поширеним є застосування системи отворів, які підводять рідину від центрального каналу, виконаного по осі трансформатора коливальної швидкості, до поверхні розпилення. Кількість отворів коливається від одного до декількох (рис. 3а,б,в). В разі великої площі поверхні розпилення, з метою збереження рівномірності змочування поверхні застосовують декілька отворів. Зазвичай отвори роблять діаметром 0,7...1мм. При наявності кавітації при ультразвуковому розпиленні засмічення таких отворів малоімовірно. В ультразвукових диспергаторах великої продуктивності для досягнення рівної провідності отворів застосовують проміжну камеру (рис. 7) [14]

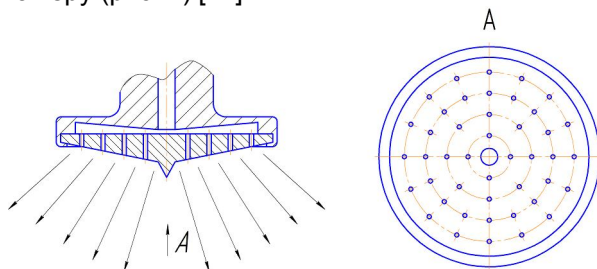


Рис. 7. Схема поверхні розпилення великої продуктивності

Витрата рідини через один отвір підведення може бути записаний як

$$Q_{oms} = \frac{1}{4} \mu \pi d_{oms}^2 \sqrt{2gH}, \quad (16)$$

де H – напір; d_{oms} – діаметр отвору, що підводить рідину; μ – коефіцієнт витрати.

Тоді необхідна для забезпечення заданої продуктивності кількість отворів становитиме

$$n_{oms} = \frac{Q}{Q_{oms}}. \quad (17)$$

Отвори конструктивно розміщують по поверхні розпилення, домагаючись рівномірного її змочування рідиною.

Якщо діаметр поверхні розпилення більший за діаметр вихідного торця трансформатора коливальної швидкості, виникає необхідність корегування акустичних розмірів трансформатора з метою забезпечення незмінної резонансної частоти.

В разі застосування найбільш технологічного ступінчастого трансформатора коливальної швидкості, згідно методики розрахунку ультразвукових диспергаторів [8,15] довжина ступеню меншої площі трансформатора коливальної швидкості (рис. 8) вираховується відповідно до залежності:

$$a_1 = \frac{c_1}{\omega} \arctg \frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1 \omega b}, \quad (18)$$

де E_1 та E_2 – модулі пружності на розтяг матеріалу трансформатора коливальної швидкості та поверхні розпилення; c_1 та c_2 – швидкість звука у відповідних матеріалах; ω – кругова частота ультразвукових коливань; b , S_2 – висота та площа еквівалентного циліндру, що відповідає масі поверхні розпилення.

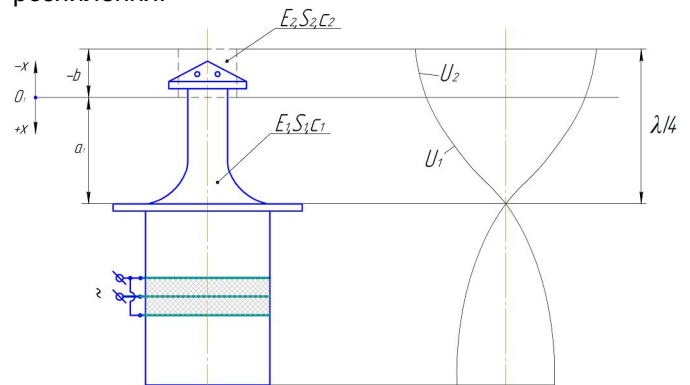
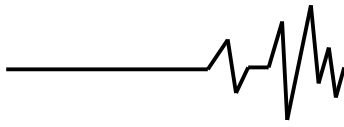


Рис. 8. Розрахункова схема напівхвильового ультразвукового диспергатора зі ступінчастим трансформатором коливальної швидкості

Маса конструкції поверхні розпилення в загальному вигляді визначається залежністю

$$m_1 = \frac{E_2}{c_2^2} V_{нов.р.} + m_{ш.р.}, \quad (19)$$

де $V_{нов.р.}$ – об'єм конструкції поверхні розпилення; $m_{ш.р.}$ – маса шару рідини на поверхні розпилення.



Маса циліндру, еквівалентного по масі елементам конструкції поверхні розпилення, визначається як

$$m = \frac{E_1}{c_1^2} S_2 b \quad (20)$$

Тоді висота еквівалентного циліндру буде дорівнювати

$$b = \frac{\frac{E_2}{c_2^2} V_{нов.р.} + m_{ш.р.}}{\frac{E_1}{c_1^2} S_2} \quad (21)$$

Отримане значення висоти еквівалентного циліндру використовується при розрахунках за формулою (18).

Висновки

Представлено інженерну методику розрахунку ультразвукового диспергатора, яка дозволяє отримати акустичні розміри елементів диспергатора та поверхні розпилення, що забезпечують задану продуктивність та дисперсність аерозолі при необхідній формі факелу розпилення. Запропонована методика враховує ефект виникнення на нормально віброуючій поверхні стоячих капілярних хвиль, існування яких було підтверджено в ході експериментальних досліджень. Експериментально підтверджена відома [10] аналітична залежність для розрахунку капілярних хвиль на поверхні тонкого шару рідини, що вкриває нормальну віброуючу поверхню.

Література

1. Луговський, О. Ф. Спосіб та пристрої для отримання рідинного аерозолі / О. Ф. Луговський, А. В. Ляшок, Ю. О. Пижигов // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – 2011. – № 61, том 1. – С. 107 – 113.
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. Ляшок А.В. Ультразвукове розпилення рідини у мехатронних системах штучного мікроклімату / А.В. Ляшок, О.Ф. Луговський // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідраліка і пневматика» – №4 (34) 2011. – С. 20– 25.
4. 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. – 2000. – Вип. 7. – С. 30-33.

5. 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". – 1998. – Том III. – С. 293-299.

6. Bisa K. Zerstaubung von Flüssigkeiten mit Ultraschall. / K. Bisa, K. Dirnagl, R. Esche - Siemens Z., – 1954. – 28, 8, 314.

7. Faraday M. On a Peculiar Class of Acoustical Figures and on Certain Forms Assumed by Groups of Particles upon Vibrating Elastic Surfaces / M. Faraday. — Philos. Trans., Roy. Soc., Ser. Math, and Phys. Sci., – 1831. – 121, 2, 299.

8. Луговський А.Ф. Ультразвуковая кавтация в современных технологиях: монограф. / А.Ф. Луговської, Н.В. Чухраев. – К. 2007. – 244 с. – ISBN 966-594-927-6.

9. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ // Пер. с яп. Л.Масленникова / Под ред. И.И.Портнова, В.В.Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

10. Экнадиосянц О.К. Получение аэрозолей / О.К. Экнадиосянц. - В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. - М.: Наука, 1970. - С. 339-392.

11. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Сов. энцикл., 1979.-400с.

12. Stamm K. Die Vernebelung schmelzbarer Festkörper mit Ultraschall / K. Stamm. — Forschungsber. Landes Nordrhein-Westfalen, N 933. Koln und Opladen, W. D. V., – 1960.

13. Pohlman R. Untersuchung zum Mechanismus der Ultraschall Vernebelung an Flüssigkeitsoberflächen im Hinblick auf technische Anwendungen / R. Pohlman, K. Stamm. — Forschungsber. Landes Nordrhein-Westfalen. N 1480. Koln und Opladen, W. D. V., – 1965.

14. Патент України № 96525. Пристрій для обробки рідини / О.Ф. Луговський, А.В. Мовчанюк, І.А. Гришко, А.В. Ляшок. – Опубл. 10.11.2011. – Бюл. № 21. – 6 с.

15. Луговской А.Ф. Расчет ультразвуковых диспергаторов с составными пьезоэлектрическими преобразователями // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение. – 1998. - Вып.33. – С.291-296.