

## СПОСОБИ ТА ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОТРИМАННЯ РІДИННОГО АЕРОЗОЛЮ

---

*Приведен анализ различных способов распыления жидкости. Рассмотрены устройства для реализации указанных способов. Рассмотрены такие параметры распылителей, как дисперсность аэрозоля, производительность и форма аэрозольного факела. Показана возможность применения различных распылителей в составе мехатронных систем управления.*

*An analysis of the different method of spraying liquid. Reviewed arrangements for the implementation of these methods. Considered options such dispensers as an aerosol dispersion, productivity and the shape of the aerosol plume. The possibility of using different nozzles in the mechatronic control systems.*

---

### Вступ

Багато технологічних процесів ґрунтуються на використанні рідинного аерозолю. Це, перш за все, широке коло технологічних процесів в машинобудуванні, двигунобудуванні, приладобудуванні, хімічній промисловості, медицині та сільському господарстві. Ефективність вказаних технологічних процесів в значній мірі залежить від параметрів рідинного аерозолю, що використовується.

Так, наприклад, для систем підготовки паливно-повітряних сумішей в двигунобудуванні необхідно отримати паливний аерозоль з дисперсністю 50...150 мкм при карбюраторній системі та 15...60 мкм при точковій або розподіленій системі впорскування палива за допомогою електромагнітних форсунок [1 -5].

В технологічному процесі нанесення просвітлюючого покриття на кремнієві пластини при створенні світлочутливих елементів живлення в приладобудуванні високої ефективності вдається досягти при дисперсності аерозолю 5...15 мкм.

В харчовій промисловості у ковбасному виробництві технологічний процес вимагає постійного зволоження продукту. При цьому бажана вологість досягається при дисперсності аерозолю, що насичує термічну камеру, в межах 10...30 мкм.

В медичній практиці, наприклад, в пульмонології активно використовують аерозоль лікувальних настоїв та медичних препаратів. При цьому необхідний аерозоль з різним розміром крапель, оскільки краплі великого розміру не ефективні при лікуванні бронхіол та альвеол легенів. Вони не досягають маленьких за розмірами альвеолярних ходів. В той же час, при лікуванні верхніх дихальних шляхів найбільш ефективним буде лікарський аерозоль з дисперсністю 10...30 мкм, оскільки краплини цього діапазону розмірів здатні осісти на поверхні верхніх дихальних шляхів. Більш дрібний аерозоль не здатен ефективно їх зволожити [5 -7].

В медичному приладобудуванні при створенні, наприклад, камер штучного мікроклімату для догляду за хворими та слабкими, виникає потреба насичення замкнутого об'єму аерозолем ліків з дисперсністю 0,5...5 мкм. При цьому впорскування або випаровування аерозолю в об'єм не припустимо, оскільки треба підтримувати постійний тиск і температуру.

В сільському господарстві при створенні сучасних тепличних комплексів активно застосовують рідинний аерозоль для отримання необхідної вологості атмосфери. При цьому використання аерозолю з діаметром краплин більше 300...400 мкм неприпустимо, оскільки великі рідинні краплі, що осіли на листову поверхню, за умови потужного штучного тепличного освітлення, перетворюються в оптичні фокусуєчі системи і ушкоджують листя, пропалюючи їх [7].

В наведених випадках мова йде про отримання аерозолю з продуктивністю до 100 мл/хв. Але є багато технологічних процесів в машинобудуванні, хімічній та нафтопереробній промисловості та в сільському господарстві, де виникає потреба в аерозолі з діаметром крапель 500 мкм і більше при продуктивності до 6000 л/год.

Сучасний стан промисловості вимагає створення автоматизованих мехатронних систем, в яких до пристроїв розпилення рідини пред'являються як вимоги по забезпеченню необхідних дисперсності, продуктивності та форми аерозольного факелу, так і вимоги швидкодіючого електронного керування ними [8].

**Метою** статті є аналіз існуючих способів та пристроїв розпилення рідини та можливостей побудови на їх основі мехатронних систем розпилення.

### Основна частина

Відомі способи розпилення рідини в основному можна поділити на гідравлічний, пневматичний, механічний, електростатичний, пульсаційний, з попереднім газонасиченням та акустичний [9 -11].

При гідравлічному способі розпилення рідини основним енергетичним фактором, що призводить до подріблення суцільності рідини є тиск нагнітання. Рідинний потік за рахунок протискування крізь малий отвір набуває високої швидкості і приймає форму (струмінь, півка, великі краплі), яка сприяє ефективному та швидкому розпаду.

Велику роль у цьому способі розпилення відіграють конструктивні особливості форсунок, за допомогою яких вдається отримати необхідну форму факелу аерозолі. За принципом дії вони поділяються на струминеві, із зіткненням струменів, ударно-струминеві, відцентрові, відцентрово-струминеві та комбіновані.

Приклад схеми форсунки із зіткненням струменів показаний на рис. 1а. Розпилення відбувається за рахунок зіткнення двох і більше струменів, які витікають із насадків, отвори яких мають циліндричну або плоску форму. Зіткнення плоских струменів значно ефективніше. При цьому у перерізі факел буде нагадувати прямокутник. Регулювання розміру факелу можливе за рахунок змін параметрів вихідних плоских струменів, їх кількості та кута зіткнення. Малі розміри отворів подібних форсунок вимагають якісного фільтрування рідини, що розпилюється. Автоматизоване керування продуктивністю, дисперсністю та формою факелу аерозолі майже не можливе. Зміна будь-якого параметру призводить до зміни умов зіткнення струменів.

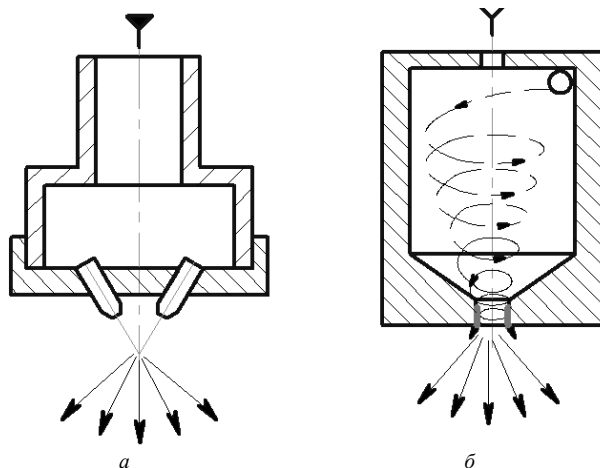


Рис. 1. Конструктивні схеми гідравлічних форсунок  
(а – форсунка із зіткненням струменів; б – відцентрова форсунка)

Розпилення рідини у відцентрових форсунках відбувається (рис. 1б) за рахунок закручування рідини, яка подається в форсунку за допомогою тангенціального каналу. Рідина рухається у вигляді плівки по спіралі уздовж стінки соплового каналу, а середина заповнюється повітряним вихором. Покидаючи сопло, плівка рветься на краплі, які формують факел у формі порожнистого конуса. Зміна продуктивності, в даному випадку, можлива, але призводить до значної зміни умов утворення та руйнування рідинної плівки і тому суттєво впливає на дисперсність аерозолі. При гідравлічному способі розпилення вдається отримати аерозоль з дисперсністю від 30 до 500 мкм.

При пневматичному способі розпилення енергія підводиться до рідини в наслідок динамічної взаємодії рідини з потоком газу. Розпилення відбувається за рахунок впливу потоку газу, який виходить з

каналу на великій швидкості, на рідину, швидкість якої порівняно не велика. Спочатку рідина розшарується на окремі струмені за рахунок великої відносної швидкості потоків у розпилювачі або за його межами, а згодом струмені подрібнюються на краплини. Дисперсність аерозолі при пневматичному способі розпилення лежить в межах 50-200 мкм.

Цей спосіб, як і попередній, передбачає використання форсунок, які класифікуються за п'ятью основними ознаками:

- рівень перепаду тиску (форсунки низького тиску, високого тиску та пневмогідравлічні);
- місце контакту рідини та газу (форсунки зовнішнього та внутрішнього змішування);
- розподілення маси (форсунки одно- та багатоструминеві);
- характер руху потоків перед розпиленням (форсунки прямоструйні та вихрові);
- напрямлення руху рідини та газу (форсунки з однонаправленим, зустрічним та перехресним рухом потоків).

У форсунках внутрішнього змішування (рис. 2а) потоки рідини і газу взаємодіють між собою перед витіканням із форсунки, попередньо утворюючи великі краплі, які при взаємодії з навколишнім середовищем розпадаються на більш дрібні.

У форсунках зовнішнього змішування навпаки, процес змішування проходить за межами форсунки поблизу сопла. Розпилення відбувається за рахунок різниці швидкостей розпилювального газу, рідини та навколишнього середовища.

Загальними недоліками цих форсунок є необхідність у розпилюючому агенті та в обладнанні для його подачі.

Регулювання дисперсності та продуктивності можливе в деяких межах за рахунок змін співвідношення параметрів потоку рідини та газу за допомогою зовнішніх агрегатів.

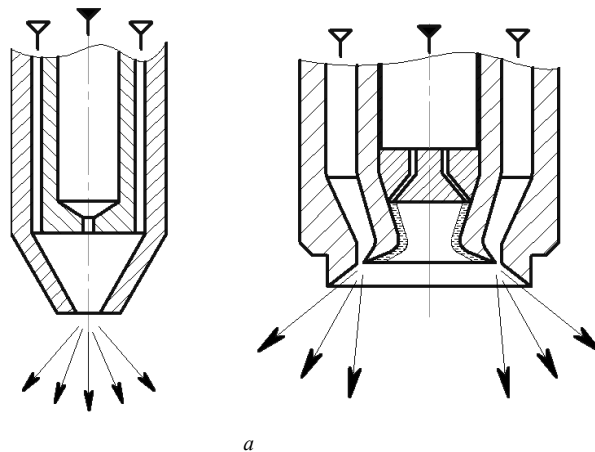


Рис. 2. Конструкції пневматичних форсунок  
(а – форсунка внутрішнього змішування; б – форсунка зовнішнього змішування)

При механічному способі розпилення рідина отримує енергію за рахунок тертя об швидкообертвовий робочий елемент. За рахунок відцентрових сил рідина зривається з розпилювача і подрібнюється на краплі, що дозволяє отримати аерозоль з дисперсністю 200...600 мкм.

Форсунки, що використовують механічний спосіб розпилення, різняться способом підводу рідини та конструкцією обертвового робочого елементу.

Можливі безпосередня подача рідини на робочий елемент та занурення робочого елементу (рис. 3а,б). За конструкцією робочого елементу можна виділити дискові, чашкові, конусні, зіркові, соплові і реактивні розпилювачі.

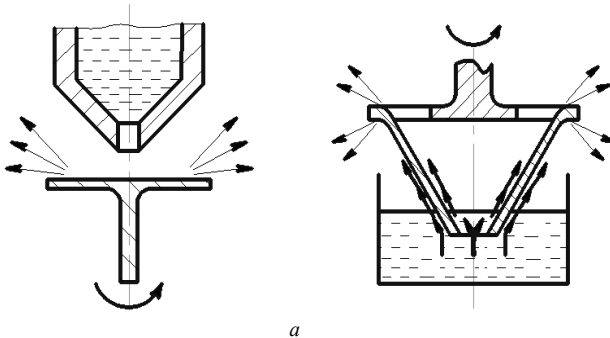


Рис. 3. Конструкції механічних розпилювачів (а – дисковий робочий елемент; б – конусоподібний робочий елемент)

Форма факелу при механічному розпиленні та всі його характеристики визначаються конструкцією та класом робочого елемента, за винятком, коли привід та робочий елемент складають одне ціле. Тому, наприклад, у розпилювача з дисковим робочим елементом (рис.3а) рідина, потрапляючи на поверхню диска у вигляді струменя, приймає вигляд тору і за рахунок відцентрових сил відривається подрібнюється на краплі, утворюючи широкий факел. Певний інтерес викликає конструкція з конусним робочим елементом (рис.3б), яка дозволяє збільшити продуктивність у двічі. Занурений у рідину конус обертається навколо своєї осі. Рідина, завдяки дії відцентрових сил, підіймається в гору по внутрішній та зовнішній

стінках конуса до його основи, де відривається у вигляді крапель.

Наявність обертвових елементів в умовах високої вологості суттєво зменшує надійність розпилювачів цього класу.

В цьому випадку продуктивність та дисперсність аерозолі пов'язані між собою і тому можливість керування такими розпилювачами дуже обмежена.

При електростатичному способі розпилення під дією електричного поля на поверхні плівки рідини відбувається деяке розподілення тисків, які деформують плівку і викликають втрату нею стійкості, що призводить до руйнування плівки і утворення крапель.

Шляхом підводу електричного потенціалу до штуцера розпилювача відбувається електризація розпилювальної рідини в спеціальних електростатичних форсунках, які умовно можна поділити на три основні групи: для розпилення рідини, для нанесення покриття і для розпилення порошків.

Конструктивна схема електростатичної форсунки для розпилення рідини представлена на рис.4.а. Це звичайна відцентрова форсунка, але з додатково встановленим електропровідним стрижнем, який під'єднаний до джерела струму. Для розпилення рідини на форсунку подається напруга, яка сприяє перерозподіленню швидкості руху рідини і дає змогу змінювати дисперсність та кут факелу.

При нанесенні покриття на поверхню необхідно забезпечити рівномірне розпилення по всій площі. Для цього можна використати форсунку, зображену на рис.4б. На пневматичну форсунку зовні встановлено електрод, який вмонтовано у кільцевий ізолятор. При подачі напруги на електрод біля його гострих кромek розвивається коронний розряд, який сприяє утворенню іонів одного знаку, які, в свою чергу, заряджають уніполярно краплі аерозолі. В цей час між поверхнею і електродами утворюється електростатичне поле. Рухаючись уздовж силових ліній поля заряджені краплі примусово і рівномірно осідають на поверхні.

Перевагою вказаних форсунок є малі непродуктивні втрати аерозолі завдяки контрольованому і спрямованому уздовж силових ліній руху крапель аерозолі. Але експлуатація подібних високовольтних пристроїв вимагає спеціальної фахової підготовки обслуговуючого персоналу.

При пульсаційному способі розпилення руйнування рідини відбувається за рахунок накладання пульсацій на потік рідини, що призводить до збільшення поверхневої енергії, швидкої втрати стійкості потоку і більш тонкого диспергування. Відомо два принципово різних метода накладання пульсацій: за рахунок перекидання соплових отворів або прохідних каналів (рис. 5а) та за рахунок збудження коливального тиску перед форсункою (рис.5б).

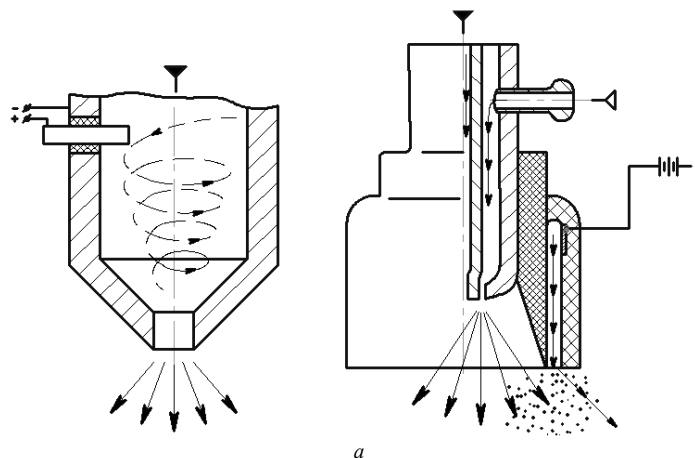


Рис. 4. Конструктивні схеми електростатичного розпилення (а – форсунка для розпилення рідини; б – форсунка для нанесення покриття)

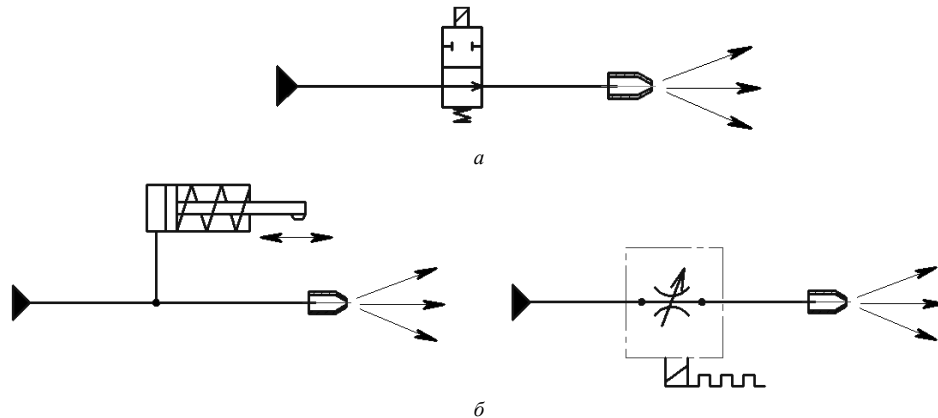


Рис. 5. Конструктивні схеми пульсаційних розпилювачів (а – форсунка з переривником; б – форсунки зі збудником)

Пульсаційний спосіб розпилення добре поєднується з будь-яким з вище розглянутих способів, покращуючи його характеристики.

При способі розпилення з попереднім газонасиченням для збільшення поверхневої енергії в рідині перед витоком з форсунки попередньо в магістраль або в розпилювач вводиться інертний по відношенню до обох фаз або технологічний газ.

Розроблено декілька схем форсунок для реалізації даного способу розпилення. Між собою вони різняться способом введення газу. За цією ознакою їх можна поділити на форсунки з примусовим введенням газу (рис. 6а), з ежекцією (рис. 6б) і з одночасним використанням газу та ежекції.

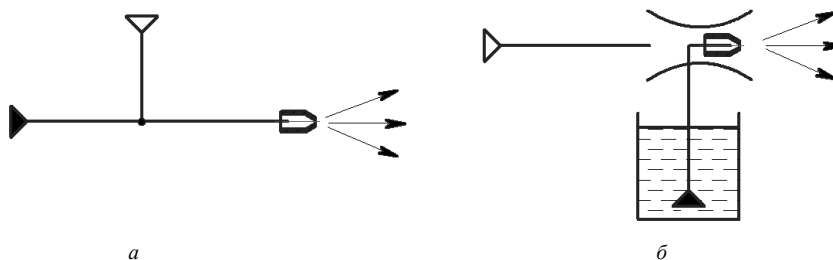


Рис. 6. Конструктивні схеми форсунок з попереднім газонасиченням (форсунка з примусовим введенням газу; форсунка з ежекцією)

Перевагою цих конструкцій є зменшення дисперсності аерозолі. Однак, для досягнення необхідного ефекту у форсунках з примусовим газонасиченням необхідно забезпечити однаковість тисків рідини та газу, що значно ускладнює необхідне обладнання.

Наведені способи розпилення мають дуже обмежені можливості застосування в мехатронних системах. Отриманий за їх допомогою аерозоль, не придатний для застосування в багатьох технологічних процесах, де необхідно у складі автоматизованої системи швидко змінювати продуктивність, дисперсність та параметри аерозольного факелу [12].

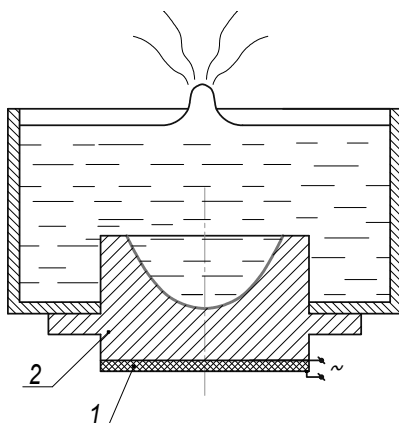


Рис. 7. Схема реалізації ультразвукового розпилення в фонтані (1 – п'єзокерамічний елемент; 2 – акустична лінза)

Отримати більш дрібнодисперсний аерозоль при високому рівні монодисперсності дозволяє акустичний спосіб розпилення. Зазвичай цей спосіб використовує ультразвуковий діапазон коливань. Акустична енергія підводиться до границі розділу газового і рідинного середовищ. Підведення можливе з боку рідини та з боку газу. У випадку підведення ультразвукових коливань з боку рідини можливе розпилення в фонтані та в тонкому шарі [9, 13].

Розпилення рідини у фонтані здійснюється за рахунок введення в рідину високочастотних (1...3 МГц) ультразвукових коливань. Досягнення необхідного рівня інтенсивності ультразвукових коливань відбувається завдяки застосуванню акустичних фокусуєчих систем, що забезпечують концентрацію ультразвукової енергії в точці поблизу поверхні розділу двох середовищ – рідини та газу. В якості фокусуєчих систем зазвичай використовують п'єзоелементи полусферичної форми або збиральні акустичні лінзи, під якими встановлюють звичайні плоскі п'єзокерамічні елементи (рис. 7).

За рахунок інтенсивних кавітаційних процесів поблизу фокальної точки з об'єму рідини вириваються струмені та великі за розмірами краплі, на поверхні яких утворюються стоячі капілярні хвилі. При втраті стійкості з гребенів капілярних хвиль зриваються близькі до монодисперсних маленькі краплі аерозолу. Великі краплі, які не встигли диспергуватися, системою відбивачів повертаються назад до об'єму рідини. Дисперсність цього способу розпилення знаходиться у діапазоні 0,5...5 мкм.

Нажаль факел аерозолу, що утворюється при цьому способі розпилення, не піддається формуванню, оскільки незначні по масі краплинки аерозолу легко відносяться в різні боки при незначному русі повітря. Регулювання продуктивності, в даному випадку, практично не можливе.

Розпилення рідини в тонкому шарі, відбувається за рахунок введення ультразвукових коливань в тонкий шар рідини, що призводить до виникнення, так званого, кавітаційно-хвильового механізму розпилення. Реалізація цього способу відбувається за допомогою спеціальних ультразвукових диспергаторів (рис. 8), в яких за рахунок застосування трансформаторів коливальної швидкості забезпечується досягнення необхідної амплітуди коливань, при якій досягається руйнування капілярних хвиль на поверхні шару рідини [9, 11, 13].

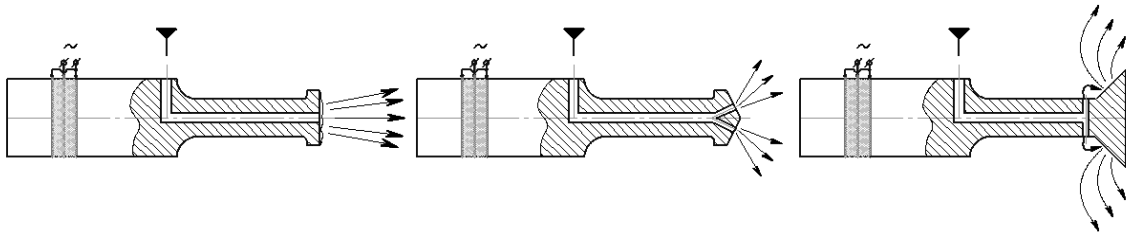


Рис. 8. Схема реалізації ультразвукового розпилення в тонкому шарі з утворенням факелів різної форми

При цьому способі розпилення отримується аерозолу з дисперсністю в межах 5...20 мкм, що дозволяє за рахунок конфігурації поверхні розпилення забезпечити необхідну форму аерозольного факелу (рис. 9 а,б). Кавітаційний принцип отримання аерозолу в ультразвукових диспергаторах забезпечує постійне очищення каналів підводу рідини, що зменшує вимоги до попереднього очищення рідини.

Цей спосіб є найбільш поширений у мехатронних системах. Він відрізняється низькою споживаною потужністю, малою інерційністю та широкими можливостями електронного регулювання продуктивності.

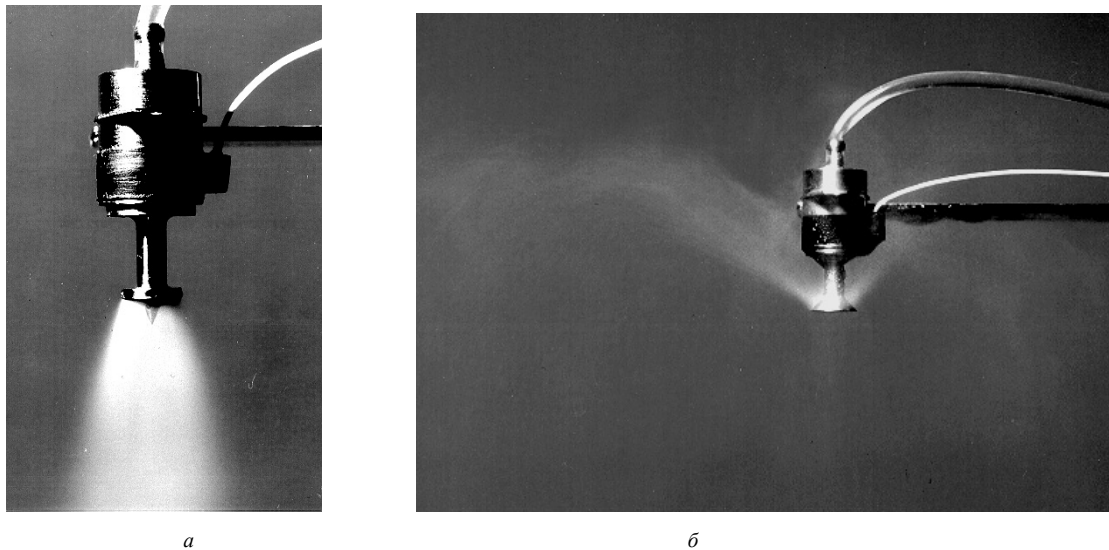


Рис. 9. Форми факелу при ультразвуковому способі розпилення  
(а – конусна форма факелу; б – парасолькова форма факелу)

### Висновки

Наведений аналіз основних способів розпилення рідини свідчить про можливість забезпечити рідинним аерозолем широке коло технологічних процесів, які потребують аерозоль з дисперсністю 0,5...500 мкм при продуктивності від одиниць мілілітрів до сотень літрів за хвилину.

Не всі наведені способи передбачають можливість електронного керування параметрами процесу розпилення, наприклад, продуктивністю.

Аналіз показав, що найбільш доцільно системи автоматичного керування будувати із залученням ультразвукового способу розпилення рідини. Швидкодія та високий ККД сучасних ультразвукових диспергаторів для розпилення в тонкому шарі дозволяють широко застосовувати їх в мехатронних системах, які забезпечують високу ефективність багатьох технологічних процесів.

### Список литературы

1. Луговской А.Ф. Возможности получения мелкодисперсного аэрозоля в медицинских ингаляторах / А.Ф. Луговской, В.И. Чорный, Н.В. Чухраев, А.В. Мовчанюк // Вестник Национального технического университета Украины „КПИ”. Машиностроение. – 2000. - Вып.38. - С. 163-168.
2. Луговський О.Ф. Отримання дрібнодисперсного аерозолю шляхом ультразвукового диспергування / О.Ф. Луговський // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение. - 1999. - Вып. 34. - С. 193– 202.
3. 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». Машиностроение. - 1997. - Вып. 32. - С. 34-38.
4. Васильев С.Н. Двигатели внутреннего сгорания / С.Н. Васильев. – М.: Машиностроение, 1995. – Т.1. – 290с.
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. 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. – С. 22-36
7. 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.
8. Пажи Д.Г. Основы техники распыления жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
9. 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.
10. Физические основы ультразвуковой технологии. / Под ред. Л. Д. Розенберга - М., Наука, 1968.
11. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Сов. энцикл., 1979.-400с.
12. Мовчанюк А.В. Особливості експлуатації ультразвукових розпилювачів в мехатронних системах / А.В. Мовчанюк, О.Ф. Луговський, А.В. Ляшок, Ю.В. Якубовський // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідраліка і пневматика» – №3 (29) 2010. – С. 41– 44.
13. Луговський А.Ф. Ультразвуковая кавтация в современных технологиях: монограф. / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К. 2007. – 244 с. – ISBN 966-594-927-6.