

# Удосконалення промислових систем осушення повітря шляхом застосування ультразвукових коливань

О.Ф. Луговський • В.А. Ковальов • В.П. Фесич • Є.Ю. Дудка

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 14 February 2018 / Accepted: 04 March 2018

***Анотація.** Наведено результати аналітичного огляду конструкцій та методів осушення запиленого вологого повітря у виробничих приміщеннях, а також запропоновано конструкцію осушувача з використанням ультразвукових коливань для підвищення ефективності осушення. Проведено аналіз аеродинамічних особливостей розвитку течії повітря в осушувачі та запропоновано оригінальну конструкцію ультразвукового трубчастого випромінювача для накладання ультразвукового поля на потік повітря. Наведені результати моделювання вібраційних коливань ультразвукового трубчастого випромінювача в режимі радіальних та радіально-згинальних коливань. Представлено результати моделювання форми ультразвукового поля всередині трубчастого вібратора. Запропонована фізична модель процесу ультразвукового очищення вологого забрудненого повітря. Представлено результати експериментального дослідження роботи трубчастого вібратора у потоці вологого повітря.*

***Ключові слова:** осушувач, аеродинамічні властивості потоку, ультразвуковий випромінювач, течія повітря, вихрові структури, ефективність осушення.*

## Вступ

Останнім часом при організації виробничих потужностей у промисловості значна увага приділяється екологічним аспектам забезпечення їх ефективної роботи, зокрема захисту персоналу від шкідливих впливів металургійних, хімічних, деревообробних та інших процесів. Зокрема мається на увазі запиленість повітря у виробничих приміщеннях, наприклад, продуктами випаровування, дрібною стружкою або деревним пилом, концентрація яких у повітрі не повинна перевищувати стандартних санітарно-гігієнічних норм. Тому завдання фільтрування та аспірації шкідливих викидів представляються досить актуальними.

Одним з поширених типів фільтрувальних засобів на зазначених об'єктах виробництва як правило є спеціальні фільтрувальні станції, на базі яких встановлюються рукавні фільтри, призначені, наприклад, для високоєфективного очищення нетоксичних газів з температурою не більше 130° (рис.1, [1]). Крім того, їх здебільшого використовують для очищення повітря, яке надходить від деревообробного цеху.

Пакетне компонування рукавних фільтрів забезпечує високу ефективність фільтрування за великих швидкостей потоку та витрати повітря. Фільтрувальні станції, як правило, складаються з корпусу, розділеного на камери неочищеного і очищеного повітря, фільтрувальних рукавів на жорсткому каркасі, клапанних секцій, бункерів, пристроїв керування регенерацією фільтра.

Тканинні фільтри можна класифікувати за конструктивними особливостями корпусу, експлуатаційними показниками роботи, галузевим застосуванням, типом фільтрувального матеріалу, а також за способом подачі запиленого повітря. Поряд з безсумнівними перевагами подібних конструкцій вони мають і певні недоліки, зокрема порівняно невелику поверхню фільтрації, що припадає на одиницю об'єму робочої камери фільтра. Крім того, виникають проблеми регенерації рукавів з огляду на вологість пилового матеріалу, який може швидко прилипати та осідати на поверхні рукавів.

## Стан проблеми та постановка задачі дослідження

Однією з досить поширених конструкцій промислових повітроочищувальних установок у теперішній час є циклон, схематичне зображення якого наведено на рис.2 [2].

За рахунок створення обертальних течій у циліндричній робочій камері та дії відцентрових сил інерції на більшій за щільністю частинки пилу циклони досить ефективно очищують запилене повітря, що надходить з

виробничого приміщення і збирають тверді частки пилю та інших забруднень у спеціальних бункерах. Експлуатація таких конструкцій дозволяє скоротити терміни обслуговування, очищення від налипання часток, відведення пилю тощо.

Циклони прості в розробці та виготовленні, надійні, високопродуктивні, можуть використовуватися для очищення агресивних і високотемпературних газів і газових сумішей. Недоліками є високий гідравлічний опір, неможливість уловлювання пилю з малим розміром частинок і невелика довговічність (особливо при очищенні газів від пилю з високими абразивними властивостями).

Ще одним важливим недоліком циклонів вважають суттєве зниження ефективності очищування через надмірну вологість запиленого повітря, що надходить крізь вхідний патрубок циклону. Воно, як правило, налипає на стінках циліндричної камери, не рухається у напрямку до бункера і, враховуючи великі швидкості повітря у цій області циклону, може навіть збурювати пристінні шари потоку, порушуючи розподіл аеродинамічних полів. Тому проблемам попереднього осушування запиленого повітря слід приділяти велику увагу.

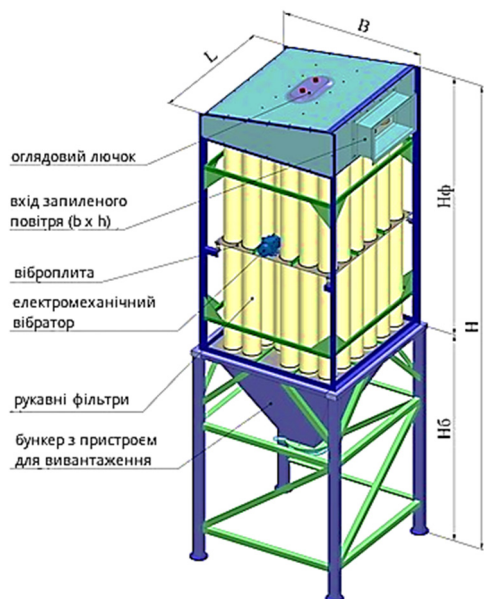


Рис. 1. Фільтрувальна станція на базі рукавних тканинних фільтрів [1]

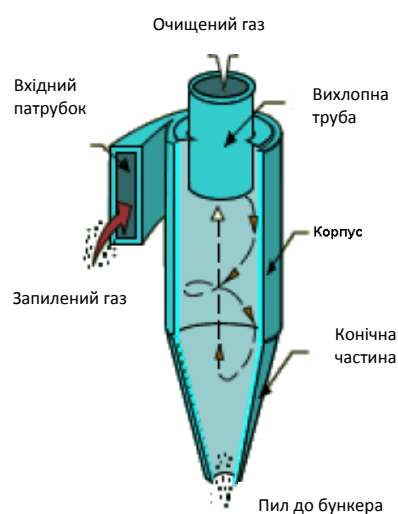


Рис. 2. Повітроочищувальна установка типу циклон [2]

Для осушування вологого повітря широко застосовують спеціальні адсорбційні осушувачі, які працюють за принципом вбирання (адсорбції) вологи спеціальними гігроскопічними матеріалами [3]. Подібні пристрої, наприклад, зображені на рис.3, досить ефективні у тих випадках, коли температура повітря становить до 10 градусів Цельсія і необхідно досягти дуже низьких показників відносної вологості (порядку 1 – 2 %). При цьому осушувач може працювати з двома зустрічно напрямленими потоками повітря, а температура повітря може підніматися максимум на 10 – 15 градусів.

Як зазначалося, з точки зору ступеня очищування вологого повітря подібний пристрій є досить ефективним, але необхідність розташування поруч з іншими елементами системи очистки подібної громіздкої конструкції викликає труднощі при компоновці технологічного обладнання.

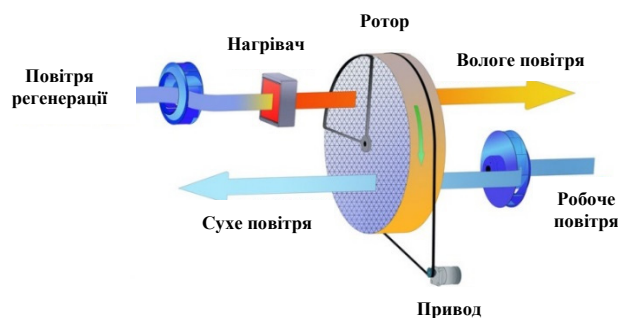


Рис. 3. Принцип дії адсорбційного осушувача вологого повітря [3]

Як представлено на рис.4, пропонується пристрій обладнаний випарником і конденсатором [4]. За допомогою вентилятора повітря з приміщення направляється до випарника. Там воно охолоджується на декілька градусів. В результаті випадає конденсат, який збирається у спеціальному резервуарі. Потім повітря потрапляє до

конденсатора, де його температура піднімається на 4-5 градусів та виводиться до приміщення. Вбудований гігостат дозволяє підтримувати вологість повітря на заданому рівні, що виключає можливість його пересушити.

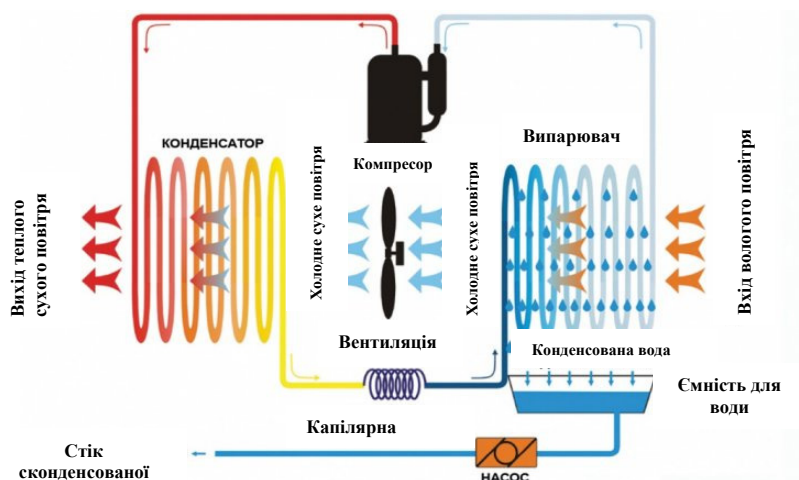


Рис. 4. Промисловий осушувач повітря [4]

Головним параметром для вибору осушувача є його продуктивність, тобто кількість води, яку агрегат може вилучити з повітря упродовж певного періоду роботи. Промислові осушувачі розраховані на великі виробничі приміщення (до 300 кв.м), безперервний режим роботи, а їх продуктивність може варіюватися від 25 до 200 літрів за добу. Одним з важливих параметрів при роботі осушувача є створюваний ним шум, рівень якого може становити до 60 дБ, що може бути некомфортним для обслуговуючого персоналу. Тому важливим аспектом для забезпечення комфортної роботи є відповідне звукоізоляційне обладнання осушувача.

Таким чином, наведені приклади застосування промислових осушувачів свідчать про їх досить великі габарити, суттєві енергоємність та необхідність забезпечення їх ефективної роботи допоміжним обладнанням для відведення вологи, компенсації шумів тощо.

Однією з досить популярних систем осушення вологого повітря є обладнання DST Seibu Giken (Швеція) [5], які не допускають явища злипання продукту при охолодженні або вентиляції сировини або готового продукту. Крім того, подібна техніка, схематичне зображення якої наведено на рис. 5, може ефективно використовуватися при розпилювальному осушенні повітря.

Досить високої якості осушення повітря, наприклад, при виробництві харчових порошків досягають за допомогою найефективнішого на даному етапі адсорбційного поглинання вологи. Поглинальний матеріал розміщують у спеціальному роторі, обертання якого збільшує площу поглинача, що забезпечує якісне та швидке прибирання вологи з харчових сумішей. У процесі поглинання вологи реалізують регенерацію адсорбента, у результаті чого матеріал швидко відновлює свою поглинальну здатність.

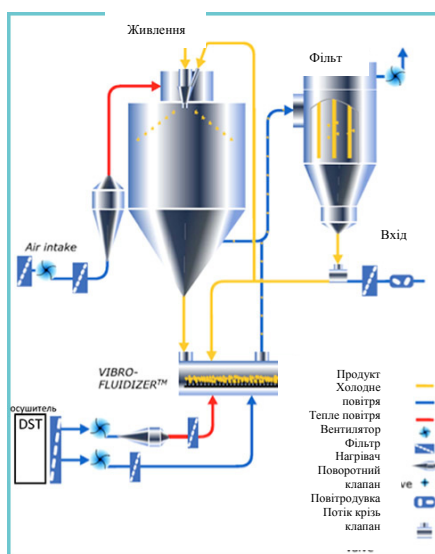


Рис. 5. Осушувач DST Seibu Giken (Швеція) [5]

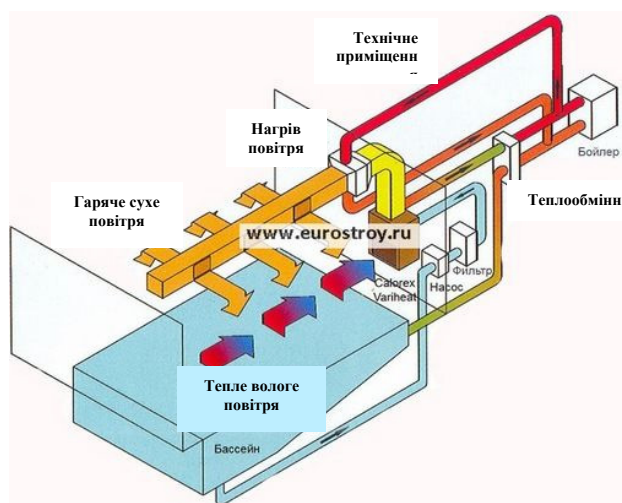


Рис. 6. Схематичне зображення каналної системи Dantherm [6]

Останнім часом набули великої популярності системи осушення приміщень з високою вологістю повітря, наприклад, у басейнах. Для цього можна скористатися каналними системами Dantherm [6], схема однієї з яких представлена на рис.6. У порівнянні з приточно-витяжною вентиляцією дозволяють мінімізувати подачу свіжого повітря, тобто зменшити витрати на обслуговування басейна.

Подана система здійснює осушення повітря у період, коли басейн не використовується (наприклад, вночі) без подачі свіжого повітря (відсутність витрат на його нагрівання) за допомогою теплового насоса, при цьому здійснює рекуперацію тепла на нагрівання води, а також рециркуляційного повітря. Канальна система, у порівнянні зі стандартними пристроями, виробляє додаткове безкоштовне тепло, яке використовується для нагріву припливного і рециркуляційного повітря і / або води у басейні.

Для порівняння, вентиляційне обладнання стандартного виконання швидко виходить з ладу через корозію і вимагає постійних витрат на обслуговування і ремонт, так як не розраховане на роботу в агресивному середовищі. Важлива також правильно організована система повітропроводів і розподіл повітря по приміщенню, щоб сухе тепле повітря обдувало зовнішні стіни, вікна, та ті конструктивні елементи, які у зимовий період більш холодні і на яких є ризик випадання конденсату.

Таким чином, враховуючи вищенаведене, можна стверджувати, що найбільш ефективні системи осушення вологого повітря мають досить великі габарити, є енергоємними та вимагають додаткового обслуговування, що суттєво збільшує їх остаточну вартість. Тому розробка новітніх високоефективних засобів осушення є достатньо актуальною проблемою сучасного виробництва.

### Застосування ультразвукового вібратора для підвищення ефективності осушення повітря

Для підвищення ефективності осушення повітря та очищення від дрібного пилу авторами запропоновано застосувати в технологічному обладнанні спеціальний ультразвуковий трубчастий вібратор (рис.7) [7, 8]. Пристрій складається з вертикально встановленого трубчастого вібратора 1, до зовнішньої поверхні якого по твірній лінії торцевою вихідною поверхнею жорстко приєднаний трансформатор коливальної швидкості 2 з ножевидною формою вихідного торця. Трансформатор 2, демпфер 3 та п'єзокерамічні кільця 4 утворюють ультразвуковий складений резонансний привід поздовжніх переміщень, в якому при збудженні резонансних поздовжніх коливань встановлюється хвиля деформації 5.

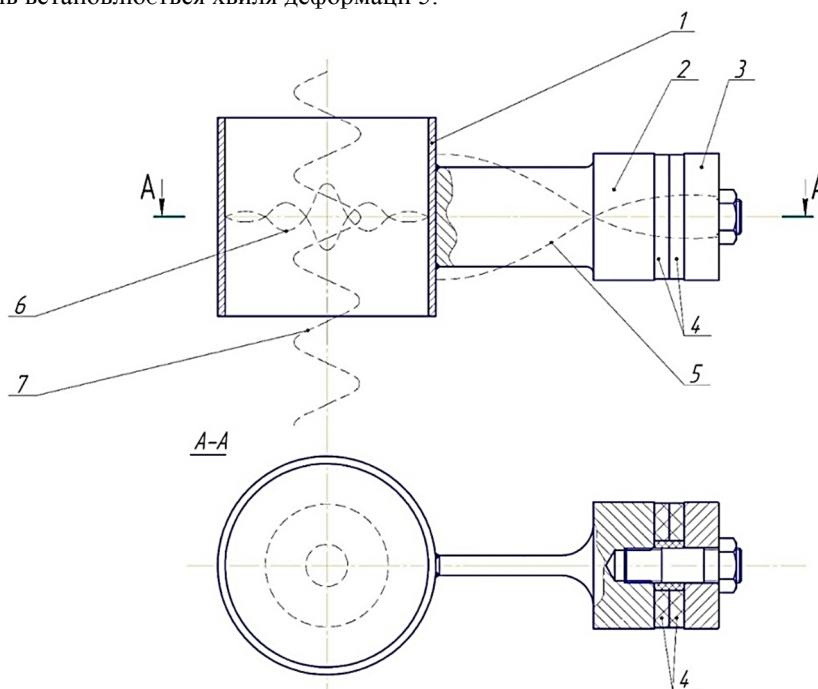


Рис. 7. Ультразвуковий осушувач повітря [7, 8]

Внаслідок зворотного п'єзоелектричного ефекту електричний генератор збуджує ультразвукові резонансні поздовжні коливання складеного привода, що призводить до збудження радіальних коливань трубчастого вібратора 1. Геометричні розміри вібратора 1 та ультразвукового складеного привода поздовжніх переміщень розраховані таким чином, що резонансна частота радіальної або радіально-згинальної моди коливань вібратора 1 дорівнює резонансній частоті поздовжніх коливань складеного привода. Трансформатор коливальної швидкості 2 дозволяє суттєво збільшити амплітуду коливань, що полегшує узгодження ультразвукового вібратора з повітряним навантаженням.

Результати моделювання роботи ультразвукового вібратора, навантаженого повітрям, виконаного в середовищі ANSYS ABAQUS, представлено на рис.8 [9]. Для аналітичного представлення ультразвукового поля

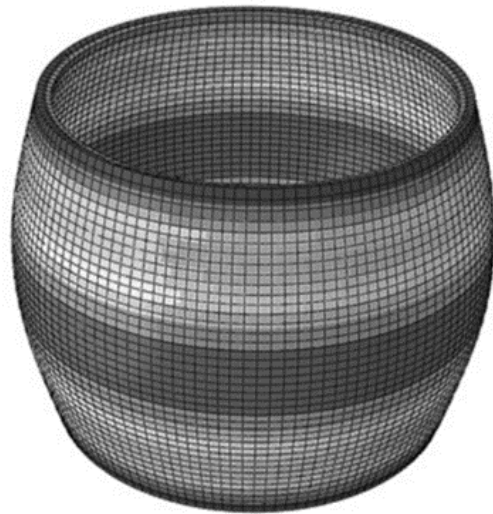
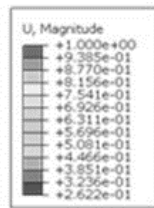
всередині трубчастого вібратора можна скористатися запропонованими у роботах [10, 11] рівняннями для потенціалу швидкості та звукового тиску, що виникають у середовищі, яке заповнює трубчастий вібратор:

$$\Phi_m(r, \phi, z, t) = A_m J_m(\mu_p r) \cos m_T \phi \cdot e^{j\gamma_p z} \sin \omega t ;$$

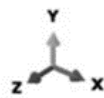
$$p(r, \phi, z, t) = A_m \rho \omega J_m(\mu_p r) \cos m_T \phi \cdot e^{j\gamma_p z} \cos \omega t ,$$

де  $r$  - радіус-вектор;  $\phi$  - полярний кут;  $z$  - координата вздовж осі вібратора;  $A_m = A \cdot C \cdot U$  - константи, які визначаються за допомогою граничних умов;  $J_m(\mu_p r)$  - циліндрична функція Бесселя порядку  $m$ ;  $\omega = 2\pi f$  -

кругова частота;  $\gamma_p = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \mu_p^2}$ ;  $\mu_p^2$  - деяка постійна величина;  $c$  - швидкість звуку в середовищі;  $\rho$  - щільність середовища;  $m_T = 0, 1, 2, 3, \dots$

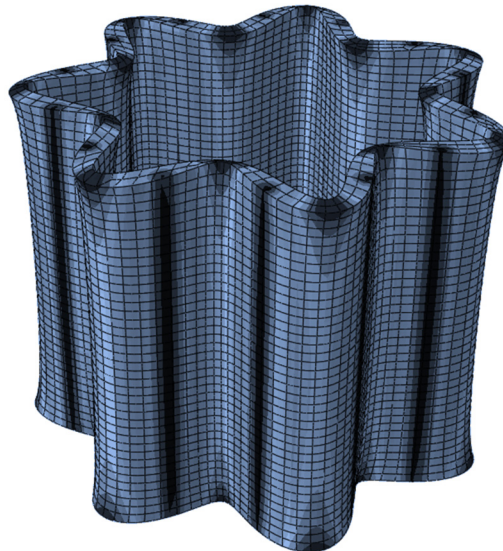
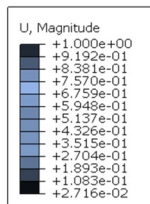


a

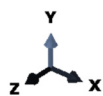


ODB: Tub\_cnctr\_tet\_s\_q.odb Abaqus/Standard 6.14-5 Thu Apr 27 19:55:29 GMT+03:00 2017

Step: Step-1  
 Mode 3: Value = 1.35749E+10 Freq = 18543. (cycles/time)  
 Primary Var: U, Magnitude  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +8.800e-03



b



ODB: Tub\_cnctr\_tet\_s\_q.odb Abaqus/Standard 6.14-5 Thu Apr 27 19:55:29 GMT+03:00 2017

Step: Step-1  
 Mode 1: Value = 1.32836E+10 Freq = 18343. (cycles/time)  
 Primary Var: U, Magnitude  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +8.800e-03

Рис. 8. Результати моделювання роботи трубчастого вібратора, збудженого на радіальній моді коливань (а) та на радіально-згинальній моді коливань (б) [9, 10]

Чисельне моделювання процесу розповсюдження ультразвукових хвиль у середовищі, що заповнює вібратор, виконане за допомогою представлених рівнянь, дозволяє отримати картину ультразвукового поля, що встановлюється всередині трубчастого вібратора [8]. У разі збудження радіальної моди коливань пучність максимальної амплітуди коливань тиску буде знаходитися у центрі вібратора 1, а при збудженні радіально-згинальної моди у центрі вібратора буде вузлова точка хвилі тиску (рис.7).

Насичене вологим пилом повітря проходить крізь ультразвукове поле, утворене трубчастим вібратором, розкладається на складові внаслідок руху частинок забруднювача та краплинок води залежно від розмірів та ваги в зони вузлів та пучностей стоячої ультразвукової хвилі деформації [11]. У цих зонах відбувається коагуляція краплинок та укрупнення за рахунок злипання частинок забруднювача. Набравши необхідну масу, укрупнені частинки відносяться потоком повітря і за рахунок відцентрових сил осідають на стінках осушувача. Краплинки води, що потрапили на внутрішню поверхню вібратора коагулюють та змочують цю поверхню тонким шаром. Внаслідок ефекту ультразвукового розпилення у тонкому шарі ця рідина розпилюється у дрібнодисперсний аерозоль [9, 10-12], який швидко випаровується внаслідок радикального збільшення площі поверхні контакту з потоком повітря (рис.8).

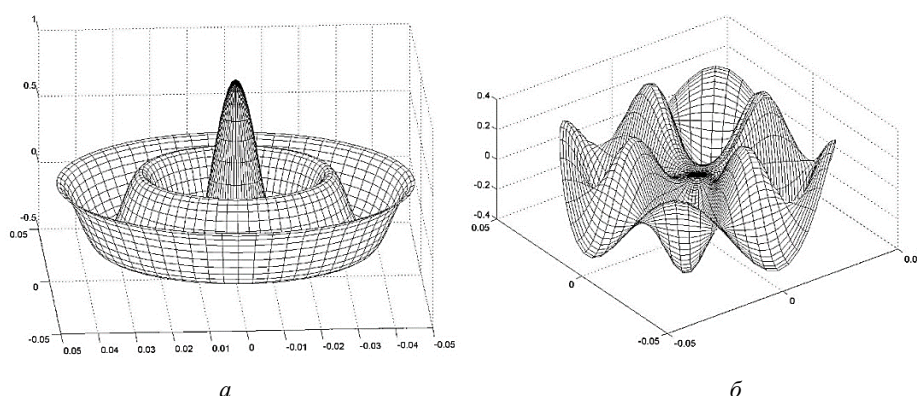
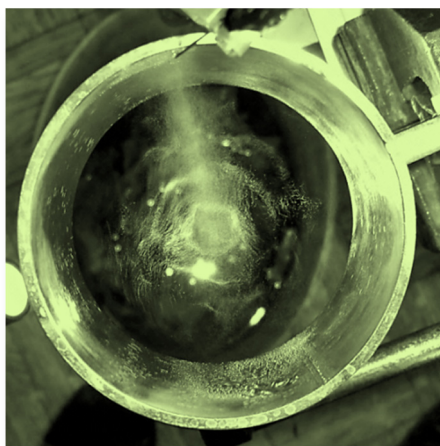


Рис. 9. Результати моделювання ультразвукового поля при збудженні радіальних коливань вібратора (а) та при збудженні радіально-згинальних коливань (б)

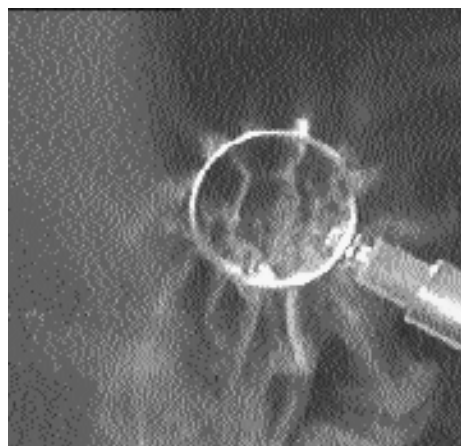
Результати експериментальної перевірки процесів, що відбуваються при роботі трубчастого ультразвукового вібратора представлені на рис.9 [9, 10, 13, 14]. З рис.10 можна спостерігати, що за рахунок проходження потоку вологого повітря має місце візуалізація ультразвукового поля всередині вібратора при збудженні радіальних (а) та радіально-згинальних (б, в) коливань. На рис.10, г візуалізовано процес ультразвукового розпилення у тонкому шарі, утвореному на внутрішній поверхні вібратора.

Представлені матеріали досліджень підтверджують запропоновану фізичну модель процесу ультразвукового осушення повітря та дозволяють сформулювати переваги подібного методу:

- досить малі габарити ультразвукового обладнання, тому воно може встановлюватися на широкому колі пристроїв відповідного очисного технологічного обладнання;
- порівняно малі витрати електроенергії для забезпечення ефективної та безперервної роботи у промислових приміщеннях;
- не потребує багатьох допоміжних заходів для очищення фільтрів, відведення води, має досить великий термін служби тощо;



а



б

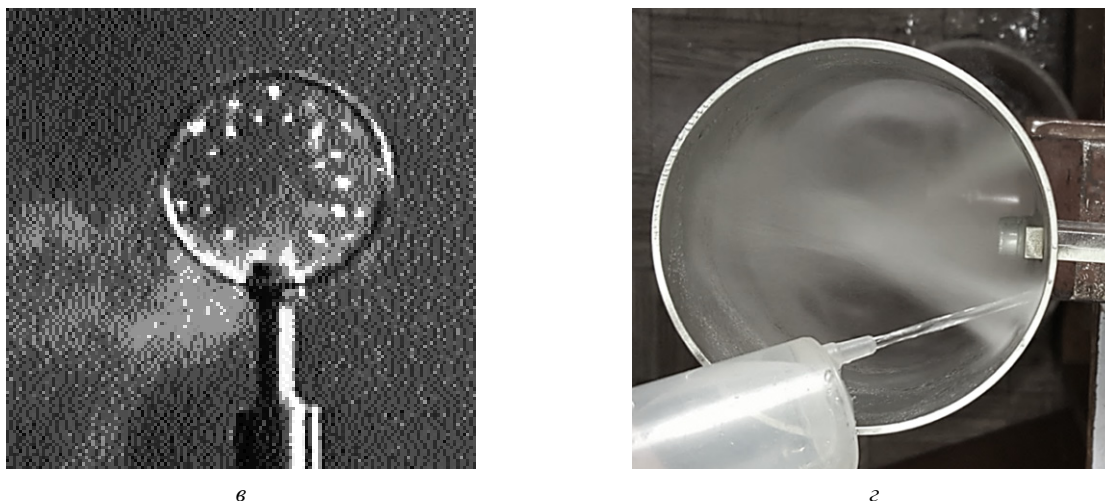


Рис. 10. Результаты экспериментальных исследований работы ультразвукового трубчатого вибратора при осушении воздуха: а – визуализация ультразвукового поля при радиальных колебаниях вибратора; б, в – визуализация ультразвукового поля при радиально-изгибных колебаниях вибратора; г - процесс ультразвукового разпиления у тонкому шарі

### Висновки

Аэродинамічні аспекти процесу осушення запиленого вологого повітря включають до себе встановлення особливостей протікання потоку повітря крізь штучні перешкоди типу тканинних фільтрів, лабіринтних гідравлічних опорів тощо. Втрати напору на подібних елементах системи осушування суттєво знижують ефективність її роботи та змушують значно збільшувати потужність енергосистеми живлення.

Застосування ультразвукового методу осушення запиленого вологого повітря дозволяє уникнути застосування потужних енергосистем, майже на 65 % зменшити енерговитрати та встановити деякі нові аеродинамічні закономірності розподілу трьохфазного середовища типу «повітря + тверді частки пилу + краплинки вологи». Ефективне відведення краплинок вологи та скупчення їх у бункері свідчить про високий, до 87 %, рівень екологічної безпеки пропонованого методу осушення.

Перспективні розробки у поданій області досліджень мають на увазі збільшення ефективності та розширення діапазону частот випромінювання ультразвукового генератора для охоплення більш потужних та великогабаритних промислових пристроїв та систем очищення повітря від промислового пилу та рідких середовищ.

## Усовершенствование промышленных систем осушения воздуха путем применения ультразвуковых колебаний

А.Ф. Луговской, В.А. Ковалев, В.П. Фесич, Е. Ю. Дудка

*Аннотация.* Приведены результаты аналитического обзора конструкций и методов осушения запыленного влажного воздуха в производственных помещениях, а также предложена конструкция осушителя с использованием ультразвуковых колебаний для повышения эффективности процесса осушения. Проведен анализ аэродинамического механизма развития замкнутых течений воздуха в осушителях и предложена оригинальная конструкция ультразвукового трубчатого излучателя для наложения ультразвукового поля на поток воздуха. Приведены результаты моделирования вибрационных колебаний ультразвукового трубчатого излучателя в режиме радиальных и радиально-изгибных колебаний. Представлены результаты моделирования формы ультразвукового поля внутри трубчатого вибратора. Предложена физическая модель процесса ультразвуковой очистки влажного загрязненного воздуха и представлены результаты экспериментального исследования работы трубчатого вибратора в потоке влажного воздуха.

*Ключевые слова:* осушитель, аэродинамические свойства потока, ультразвуковой излучатель, течение воздуха, вихревые структуры, эффективность осушения.

## Improvement of industrial air dehumidification systems by using of ultrasonic vibrations

A.Luhovskiy, V.Kovalev, V. Fesich, E. Dudka

**Abstract.** The results of analytical review of structures and methods for drying dusty moist air in industrial premises are presented, as well as a design of a dehumidifier using ultrasonic vibrations to improve the efficiency of the drying process. The analysis of the aerodynamic mechanism of closed air currents development in dehumidifiers is carried out and the original design of ultrasonic tube radiator is proposed for applying an ultrasonic field to the air flow. The results of vibrational oscillations modelling of an ultrasonic tubular radiator in the regime of radial and radial-bending vibrations are presented. The results of modelling the ultrasonic field shape inside a tubular vibrator are presented. A physical model of ultrasonic cleaning process of moist polluted air is proposed and the results of experimental study of tubular vibrator operation in a flow of moist air are presented.

**Keywords:** dehumidifier, aerodynamic flow properties, ultrasonic radiator, air flow, vortex structures, drainage efficiency.

### References

1. Дорундяк, Л.М. Обґрунтування параметрів циклона транспортних пневмосистем деревообробних підприємств [Текст]: дис. канд. техн. наук: Держ. ВНЗ Нац. лісотехн. ун-т України. – Львів, - 2015. - 173 с.
2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Циклон\\_\(пылеуловитель\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Циклон_(пылеуловитель))
3. [https://homerobot.ua/articles/desiccant\\_dehumidifier.html](https://homerobot.ua/articles/desiccant_dehumidifier.html)
4. <https://news-articles-promotions/tips/388104/3508.html>
5. <http://dst-food.ru/powders>
6. [https://www.eurostroy.ru/ventilation\\_system/ventilation\\_pools](https://www.eurostroy.ru/ventilation_system/ventilation_pools)
7. Патент України № 92987, Пристрій для кавітаційної обробки рідини /Луговський О.Ф., Гришко І.А., Мовчанюк А.В. - Опубл. 27.12.2010, Бюл. №24
8. Заявка на винахід України № а 201702783, Ультразвуковий розпилювач / Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Ткалич В.В., Орешніков О.В., Гришко І.А., Фесіч В.П., Зілінський А.І. - 24.03.2017
9. Луговской, А.Ф. “Повышение производительности ультразвуковых распылителей жидкости” - Mechanics and Advanced Technologies. 2017. - 2 (80). - С. 113 - 122.
10. Луговской, А.Ф. (2007) Ультразвуковая кавитация в современных технологиях: монография / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К. 2007. – 244 с.
11. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
12. Хмелев, В.Н. Ультразвуковое распыление жидкостей: монография. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2010. – 250 с.
13. Dalmoro, A., Barba, AA., Lamberti, G., d'Amore, M., 2012. Intensifying the microencapsulation process: ultrasonic atomization as an innovative approach. Eur. J. Phann. Biophann. 80, pp. 471- 477, doi: 10.1016 / j.ejpb.2012.01.006
14. Forde, G., Coomes, A., Gillam, Freitas, S., Merkle, H., Gander, B. 2004. Ultrasonic atomisation into reduced pressure atmosphere – envisaging aseptic spray – drying for microencapsulation. J. Control. Release vol. 95, no. 2, pp. 185-195, DOI: 10.1016/j.jconrel.2003.11.005