

**О.С. Кочетов**

(Московский государственный университет приборостроения  
и информатики; e-mail: o\_kochetov@mail.ru)

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

*Разработана методика интенсификации технологического процесса сушки диспергированных материалов с применением акустических полей в режимах работы распыливающих и пылеулавливающих устройств.*

*Ключевые слова: экологическая безопасность технологических процессов, минимальное воздействие на окружающую среду.*

**O.S. Kochetov**

## **ECOLOGICAL SAFETY OF PRODUCTION PROCESSES**

*The technique of an intensification of technological process of drying of the dispersed materials with application of acoustic fields in operating modes of spattering and dust removal devices is developed.*

*Key words: ecological safety of technological processes, minimum impact on environment.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 10 января 2014 г.

Одним из важных путей интенсификации процессов сушки диспергированных материалов является применение акустических полей в режимах работы распыливающих и пылеулавливающих устройств. Рассмотрим режим работы распылительной сушилки [1, 6-8], работающей по принципу параллельного тока движения раствора и теплоносителя, схема которой представлена на рис. 1. В качестве теплоносителя используется воздух, нагреваемый в газовом калорифере, а в качестве распыливающего устройства [2] используется акустическая вихревая форсунка, схема которой приведена на рис. 2.

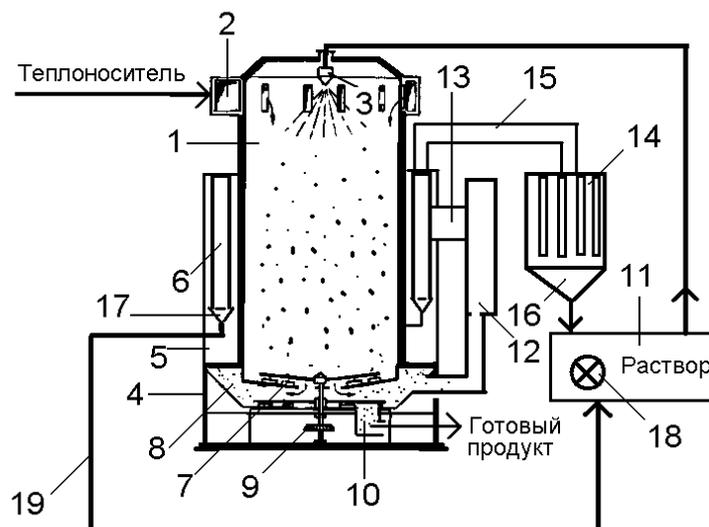
Вывод готового продукта из сушильной установки производится с использованием скребков 7 в приёмный короб 8 для готового продукта, а затем в бункер 9 для сбора готового продукта. В качестве первой ступени очистки воздуха от пыли продукта используются циклоны 6, размещенные в стояках 5, и соединенные посредством звукового канала 13 со звуковой колонной 12, причем выход звуковой колонны соединен с общим входом циклонов 6, а в качестве второй ступени очистки воздуха от пыли продукта используется рукавный фильтр 14, связанный через коллектор 15 с общим выходом циклонов. В ёмкости для исходного раствора предусмотрен смеситель 18 исходного раствора с уловленным продуктом, поступающим из бункеров 10, 16, 17, что позволяет исключить потери продукта. Частота акустических волн звуковой колонны 12 лежит в оптимальном диапазоне частот от 15 до 16 кГц с интенсивностью звука от 2 до 3 Вм/с, при этом продолжительность обработки излучателем звука осуществляется во временном интервале от 2 до 5 мин.

Рассмотрим расчёт сушилки на примере со следующими техническими условиями на протекание процесса распылительной сушки:

- максимально допустимая температура нагрева в процессе сушки исходного раствора –  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; часовая производительность по сухому продукту  $G_1 = 400\text{ кг/час}$ ; начальная и конечная влажность раствора и продукта  $w_1 = 64,3\%$  и  $w_2 = 5\%$ ; начальная температура воздуха перед сушилкой  $t_1 = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура воздуха за сушилкой  $t_2 = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Для сушки используется наружный воздух с параметрами:

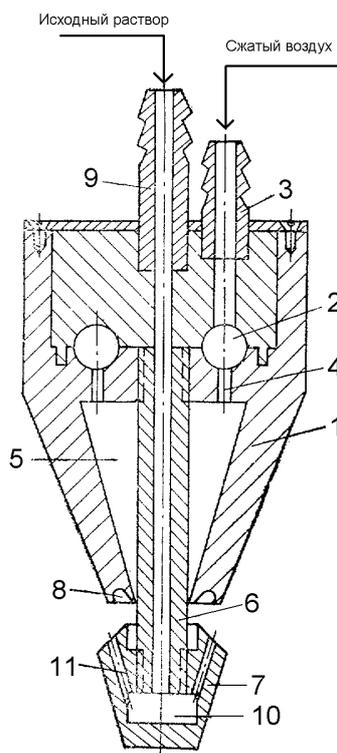
$t_0 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $d_0 = 1,47\text{ г/кг}$ ;  $\varphi = 80\%$ ;  $I_0 = 1,53\text{ ккал/кг}$ .



**Рис. 1.** Схема распылительной сушилки, работающей по принципу параллельного тока движения раствора и теплоносителя:

- 1 – сушильная камера, 2 – система воздухопроводов для подачи теплоносителя, 3 – распыливающее акустическое устройство, 4 – корпус сушильной установки, 5 – стояки для размещения системы улавливания высушенного продукта, 6 – циклон, 7 – скребковое устройство, 8 – приёмный короб для готового продукта, 9 – привод скребкового устройства, 10, 16, 17 – бункер для сбора готового продукта, 11 – ёмкость для исходного раствора, 12 – звуковая колонна, 13 – звуковой канал, соединяющий выход звуковой колонны с общим входом циклонов, 14 – рукавный фильтр, 15 – коллектор, соединяющий общий выход циклонов со входом рукавного фильтра, 18 – смеситель исходного раствора с уловленным продуктом

Для распыления раствора используем акустическую форсунку, представленную на рис. 2. Геометрические размеры форсунки рассчитываем исходя из коэффициента расхода  $\mu = 0,6$  и давления  $p = 100\text{ атм}$ . Акустические колебания распыливающего агента способствуют более тонкому распыливанию раствора, подаваемого в распределительную головку 7 через полый стержень 6, из которой раствор подаётся в виде плёнки жидкости, перекрывающей выход распыливающего агента из генератора звуковых колебаний, образованного резонатором 8. Эта плёнка дробится под воздействием акустических колебаний воздуха на мелкие капли, в результате чего образуется факел распыленного раствора с воздухом, корневой угол которого определяется величиной угла наклона конической поверхности крышки распределительной головки 7.



**Рис. 2.** Схема акустической форсунки:

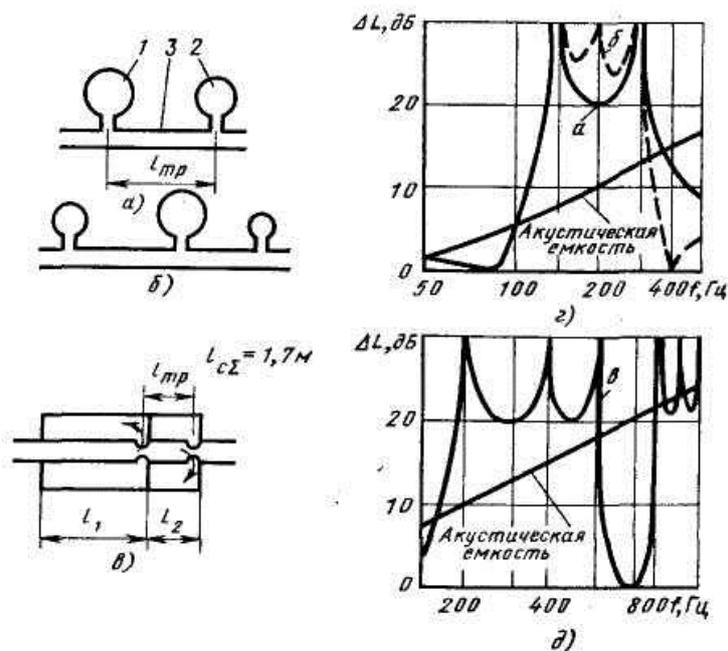
1 – корпус, 2 – коллектор, 3,9 – штуцер, 4 – дроссельное отверстие, 5 – полость, 6 – полый стержень, 7 – корпус распределительной головки, 8 – торцевая выточка, 10 – демпфирующая полость, 11 – калиброванные отверстия

Частота акустических волн, излучаемых резонатором, лежит в оптимальном диапазоне частот от 15 до 16  $\text{кГц}$  с интенсивностью звука от 2 до 3  $\text{Вм/с}$ .

На рис. 3 представлены схемы систем, состоящих из резонаторов, и их динамические характеристики, отвечающие требованиям резонансных излучателей акустической форсунки, причём каждая из схем включает в себя резонансные отражатели, настроенные на определенный частотный диапазон. Схемы 3а и 3б даны для узкополосных резонаторов при необходимости компенсации мощности излучения в широкополосных резонансных системах, а схема 3в – для синтеза узкополосных систем повышенной эффективности [3, 4].

Физический эффект работы таких систем основан на том, что при резонансном совпадении собственной и возбуждающей частот амплитуда скорости колебания воздуха в горле резонатора, которым являются отверстия в перфорированной вставке, резко возрастает, вызывая значительное возрастание мощности падающей звуковой волны (эффект резонатора Гельмгольца).

Рассмотрим применение акустических полей в режимах работы пылеулавливающих устройств. В качестве первой ступени очистки принимаем для пылеотделения циклоны системы НИИОГАЗ ЦН-15, вход которых соединен с выходом звуковой колонны, частота акустических волн которой лежит в оптимальном диапазоне частот от 15 до 16  $\text{кГц}$  с интенсивностью звука от 2 до 3  $\text{Вм/с}$ , при этом продолжительность обработки излучателем звука осуществляется во временном интервале от 2 до 5 мин.



**Рис. 3.** Системы из резонаторов и их характеристики:  
*a* – система из двух резонаторов Гельмгольца (1 и 2 – резонаторы;  
 3 – соединительная труба); *б* – система из трёх резонаторов;  
*в* – составной глушитель из четвертьволновых резонаторов;  
*г* и *д* – характеристики систем *a*, *б*, *в*  
 при одинаковом суммарном объёме камер резонаторов

Принимаем диаметр циклона 0,52 м. Тогда сопротивление  $p_{ц}$  его будет равно

$$\Delta p_{ц} = \xi \rho_{г} u_{в}^2 / 2G = 105 \cdot 0,9 \cdot 3,1^2 / 2 \cdot 9,81 = 46 \text{ мм вод. ст.},$$

где  $u_{в}$  – условная скорость воздуха в циклоне, равная 3,1 м/с.

Рассмотрим структуру акустического воздействия на вторую ступень системы улавливания продукта (рис. 4). Акустический пограничный слой у плоской твердой стенки (плоскость  $xz$ ), считая движение происходящим в плоскости  $xy$ . Учитывая приближения, обусловленные малой толщиной пограничного слоя, и нестационарный характер течения, запишем уравнение Прандтля в следующем виде [5]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial U}{\partial \tau} + u \frac{\partial U}{\partial x},$$

где производная выражена через скорость  $U(x, y)$  ядра потока в соответствии с уравнением Эйлера. В рассматриваемом случае

$$U = v_0 \cos(kc) \cdot \cos(\omega\tau) = v_0 \cos(kx) \cdot \text{Re}[\exp(-i\omega\tau)],$$

где  $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ , что соответствует стоячей плоской звуковой волне с угловой частотой  $\omega$ ,  $\text{Re}$  означает вещественную часть комплексного числа, а амплитуда колебаний скорости газа в звуковой волне в целях единообразия параметров уравнения (6) обозначена через  $v_0$ .

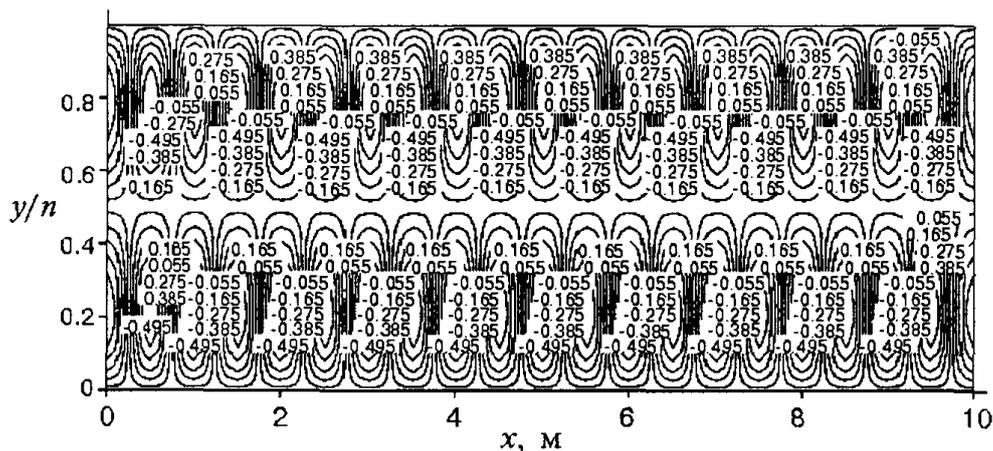


Рис. 4. Вихревые структуры при движении газа в акустическом поле

### Выводы

Исследован режим работы распылительной сушилки, работающей по принципу параллельного тока движения раствора и теплоносителя, причём в качестве распыливающего устройства используется акустическая вихревая форсунка. В качестве первой ступени очистки воздуха от пыли продукта используются циклоны, размещенные в стояках и соединённые посредством звукового канала со звуковой колонной, а в качестве второй ступени очистки воздуха используется рукавный фильтр. Частота акустических волн звуковой колонны лежит в оптимальном диапазоне частот от 15 до 16  $\text{кГц}$  с интенсивностью звука от 2 до 3  $\text{Вт/с}$ , при этом продолжительность обработки излучателем звука осуществляется во временном интервале от 2 до 5 *мин.*

### Литература

1. **Кочетов О.С.** Распылительная сушилка / Патент РФ № 2328671. Бюллетень изобретений № 19 от 10.07.2008 г.
2. **Кочетов О.С.** Акустический распылитель для растворов / Патент РФ № 2336129. Бюллетень изобретений № 29 от 20.10.2008 г.
3. **Сажин Б.С., Кочетов О.С.** Разработка метода и рациональной схемы комплексной обработки воздуха для повторного использования тепла // Успехи в химии и химической технологии. Т. XIX. № 10 (58). 2005. С. 106-109.
4. **Кочетов О.С., Сажин Б.С.** Снижение шума и вибраций в производстве: теория, расчёт, технические решения. М., 2001. 319 с.
5. **Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г., Швыдкий Д.В.** Теоретические основы очистки газов: учебник для вузов. М.: Машиностроение-1, 2001. 502 с.
6. **Кочетов О.С., Стареева М.О.** Распылительная сушилка // Патент РФ на изобретение № 2473853. Опубликовано 27.01.2013 г. Бюллетень изобретений № 3.
7. **Кочетов О.С., Стареева М.О.** Камера для проведения тепломассообмена между диспергированными частицами и газообразной средой // Патент РФ на изобретение № 2490571. Опубликовано 20.08.2013 г. Бюллетень изобретений № 23.
8. **Кочетов О.С., Стареева М.О.** Вихревая испарительно-сушильная камера с инертной насадкой // Патент РФ на изобретение № 2490573. Опубликовано 20.08.2013 г. Бюллетень изобретений № 23.