

Струйные потоки в упаковочных технологиях

А.Н. Гавва, д.т.н., Л.А. Кривопляс-Володина, к.т.н., Национальный университет пищевых технологий, г. Киев

Вопрос энергосбережения и рационального использования энергетического потенциала в технологическом процессе всегда был актуальным и первоочередным.

Упаковывание, подготовка потребительской тары, смешивание сыпучих сред, измельчение, разделение неоднородных систем, диспергирование жидкостей для различных целей производства осуществляются с образованием большой поверхности контакта фаз при сравнительно простом аппаратном оформлении. Большую часть перечисленных операций сопровождают системы струйных газовых и жидкостных потоков, необходимые для обработки поверхности упаковки, продукта либо выполнения задач отбраковывания и очистки поверхностей. Несмотря на многообразие механических устройств для распыления жидких и сыпучих сред, применяющихся в промышленности, практически отсутствуют аппараты для формирования потоков с равномерным (одинаковым для разных материалов) распределением частиц по сечению потока, а существующие устройства малопригодны для качественного распыления жидкостей, обладающих повышенной вязкостью и содержащих твердую фазу.

В известных конструкциях форсунок давления [1, 2] распад струи на капли вызван ее взаимодействием с газовой средой. Основным энергетическим фактором, влияющим на распад струи на капли, является давление нагнетания [3]. Проходя через диспергирующее устройство (сопло), жидкостный поток набирает довольно высокую скорость и преобразуется в форму, способствующую наиболее быстрому распаду (струя, пленка, крупные частицы). В некоторых случаях для снижения размеров капель давление может достигать 200–300 МПа (дизельные форсунки) [3, 4].

Гидравлическое диспергирование – простой и самый экономичный по потреблению энергии способ диспергирования (2–4 кВт на диспергирование 1 т жидкости) [4]. Однако такой способ имеет некоторые недостатки, обусловленные тем, что создаваемый факел неоднородный и имеет среди существующих способов диспергирования самую большую дисперсию образующихся капель. К тому же сильно затруднено регулирование расхода при заданном качестве дробления жидкости.

По способу нагнетания жидкости форсунки давления могут быть разделены на три типа: обычные, насос-форсунки и форсунки с гидроаккумулятором [2]. Несмотря на возможность получать сверхтонкие, практически монодисперсные распылы, данные типы форсунок малопригодны для диспергирования газовых, вязких и содержащих твердые включения жидких сред.

В пневматических форсунках [3–7] процесс дробления струи на капли происходит при взаимодействии воздушных потоков, движущихся с высокими скоростями вместе со струями жидкости.

При пневматическом способе диспергирования энергия подводится к жидкости, в основном, в результате динамического взаимодействия жидкости с потоком газа. Определяющим фактором разрушения сплошности жидкости является воздействие скоростного потока газа, выходяще-

го из канала с большой скоростью (50–300 м/с), в то время как скорость истечения жидкости сравнительно невелика. При этом возникает трение между струями газа и жидкости, в результате чего струя жидкости вытягивается в отдельные нити. Эти нити распадаются в местах утончения и образуют мелкие капли.

По способу подвода газа пневматические форсунки можно классифицировать на форсунки с внешним и внутренним подводом газа, а также с касательным и кольцевым, причем касательный и кольцевой подвод может быть осуществлен как с внешней, так и с внутренней стороны [2].

Цель исследования. Исследования проводились с целью уточнения процесса и методики определения основных параметров и характеристик струйно-реактивных пневмоагрегатов (пневмосопла обдува).

Задачами исследования являются проведение анализа возможностей использования пневмосопла на системах обдува в технологическом и упаковочном процессах пищевых производств, на участках удаления бракованных изделий, определение рациональных значений параметров системы обдува и расходных характеристик сжатого воздуха.

Во время решения поставленных заданий были проанализированы и обобщены известные литературные источники [1–8]. Возможность установки и исследования пневматического сопла рассматривалась на некоторых участках упаковочных и технологических процессов (рис. 1). Среди них: пневмосистема обработки потребительской упаковки после дозирования продукции; система санитарно-гигиенической обработки поверхности упаковки; контроль и доочистка транспортирующей системы (конвейера).

Аналитическое исследование потерь полного давления в проточной части пневмомагистрали основывается на поэлементном расчете распределения давления в сече-

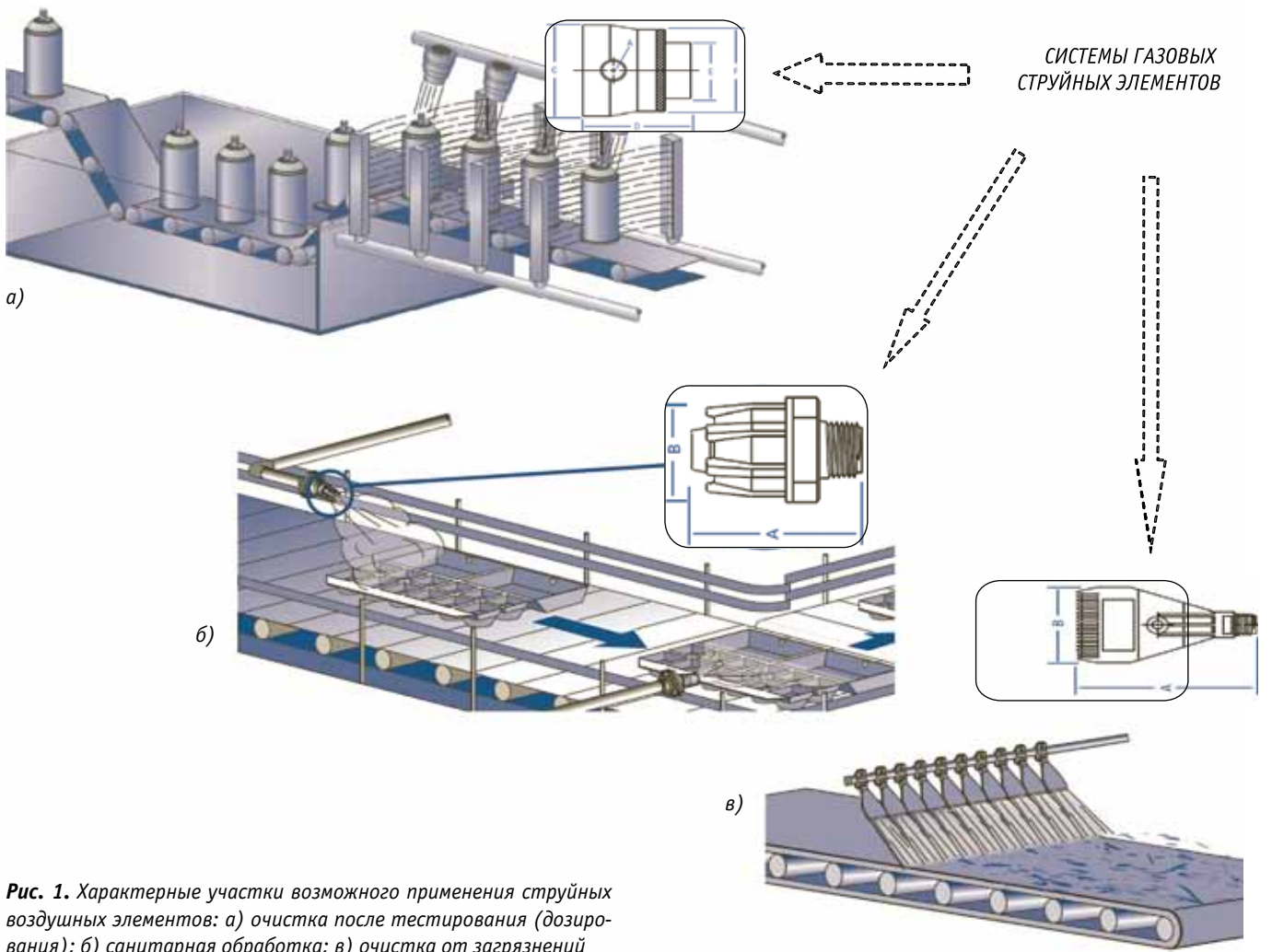


Рис. 1. Характерные участки возможного применения струйных воздушных элементов: а) очистка после тестирования (дозирования); б) санитарная обработка; в) очистка от загрязнений

нии струи и вдоль геометрической оси воздушной струи, а также распределения скорости потока в сечении сопла и вдоль геометрической оси струи. Для максимально эффективного использования энергии сжатого воздуха, в зависимости от условий и параметров обдувания (диаметр сопла, давление на входе в сопло, рабочее расстояние к участку обдувания), были исследованы пневматические схемы управления. Детально отслеживая характеристики обдувания, можно оценить условия работы пневмосистемы в целом и для технологического участка обработки продуктов и изделий в частности, разработать новые конструкции, используя результаты численного эксперимента, уточнить существующую модель рабочего процесса.

Результаты исследований. Характер изменения струи при истечении газа через сопла и насадки приведен на рис. 2. Массовый расход газа в процессе его истечения через короткую насадку из полости неограниченного объема описывается уравнением Сен-Венана и Ванцеля [2]. При изэнтропийном истекании для докритического режима

справедливо уравнение (1), для сверхкритического – зависимость (2):

$$G_s = fp_0 \sqrt{\frac{2k}{RT_0(k-1)} \left[\left(\frac{p_{o.c.}}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{o.c.}}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \frac{p_{o.c.}}{p_0} \geq \beta_{kp}; \quad (1)$$

$$G_s = fp_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \frac{p_{o.c.}}{p_0} \leq \beta_{kp}, \quad (2)$$

где G_s – массовый расход сжатого воздуха, кг/с; f – площадь проходного сечения сопла, м²; R – удельная газовая константа, Дж/(кг·К); T_0 – абсолютная статическая, полная температура, К; k – показатель адиабаты.

Численный эксперимент, выполненный на основе законов сохранения энергии и материи, наглядно подтвердил картину течения газа в пневмосети с использованием сопла и дал возможность получить рабочие характеристики для технологического оборудования. На рис. 2 показана свободная струя, которая образуется при выходе сжатого

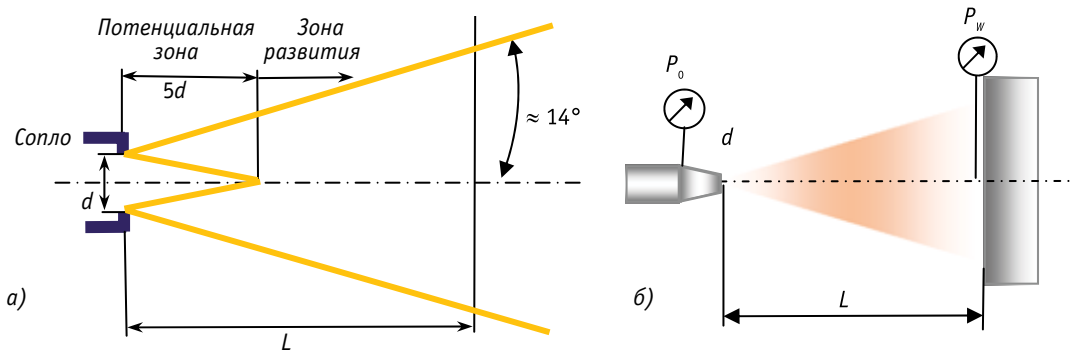


Рис. 2. Система одноканального сопла (а) и схема распределения зоны давления на выходе сопла (б)

воздуха из одноканального сопла в атмосферу (при проведении исследований использовалось сопло Meech Air Technology, диаметром 4 мм и 14 мм). Начиная от среза сопла и дальше – на расстоянии 5 диаметров сопла, формируется потенциальная сердцевина, где хранятся скорость потока, кинетическое давление и кинетическая энергия, созданные на срезе сопла. Вне этой сердцевины лежит зона ускорения, которая взаимодействует с атмосферой. Вершина потенциальной сердцевины перетекает в зону развития (похожая зона), которая привлекает к процессу окружающую атмосферу, а поперечное сечение струи растет, поскольку струя расширяется приблизительно под углом 14°.

Затраты энергии, распределение давления (рис. 3), расходные характеристики в процессе выхода сжатого воздуха в атмосферу рассчитывались при нормальных условиях окружающей среды (атм. давление $P_A = 1,013$ бар, температура воздуха $t = 20$ °C).

При $P_0 \geq 0,1$ МПа поток воздуха дросселируется, а его объемный расход рассчитывается по формуле:

$$Q = 600C(P_0 + 0,1)\sqrt{\frac{293}{273+t}} = 600 \frac{\pi}{20} 0,9d^2 (P_0 + 0,1)\sqrt{\frac{293}{273+t}} \quad (3)$$

При $P_0 < 0,1$ МПа поток (дозвуковой) находится в докритической зоне, а объемный расход воздуха равен:

$$Q = 600C(P_0 + 0,1)\sqrt{1 - \left(\frac{0,1 - P_0}{1 - 0,5}\right)^2} \sqrt{\frac{293}{273+t}} \quad (4)$$

где Q – объемные расходы, м³/мин; C – звуковая проводимость, м³/(с·бар); D – диаметр сопла, м; P_0 – давление на входе в сопло, МПа; t – температура, °C.

Звуковая проводимость сопла – это значение, которое рассчитывается с учетом $C = S/5$ и использованием эффективной площади S , которая определяется произведением коэффициента расхода (0,9) на действительное значения площади.

Скорость потока сжатого воздуха на выходе из сопла u_0 с учетом критического соотношения давлений $b = 0,5$ рас-

считываем по формуле при $P_0 > 0,1$ МПа:

$$u_0 = 331\sqrt{\frac{293}{273+t}} \quad (5)$$

а при $P_0 < 0,1$ МПа по формуле:

$$u_0 = 740\sqrt{1 - \left(\frac{0,1}{P_0 + 0,1}\right)^{0,286}} \sqrt{\frac{293}{273+t}} \quad (6)$$

Скорость свободной струи в зоне развития рассчитывается следующим образом:

$$u = u_0\sqrt{\frac{P}{P_0}}$$

где u_0 – скорость потока на выходе из сопла, м/с; u – скорость в зоне развития потока, м/с; P_0 – давление на входе в сопло, МПа; P – давление струи, МПа; t – температу-

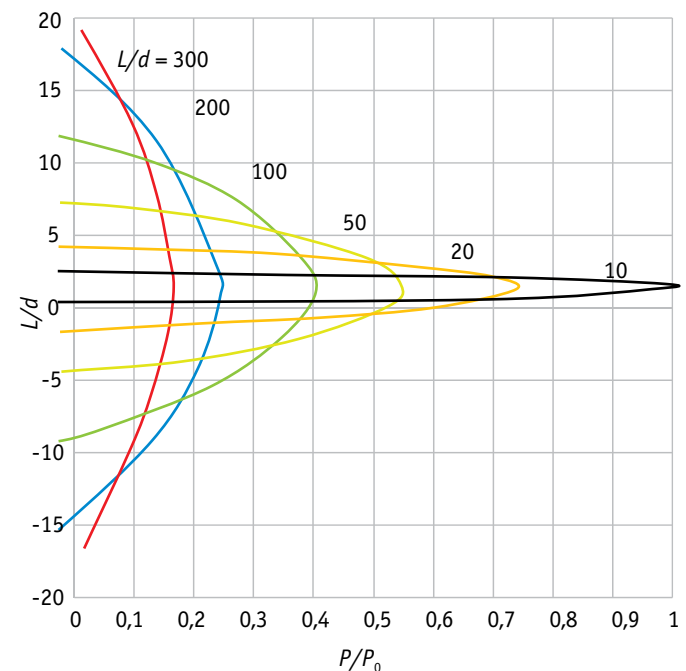


Рис. 3. Распределение давления в свободной струе по поперечному сечению в относительных порядках

ра, °С. На рис. 4 представлена гистограмма расходных характеристик сопла и открытого сечения трубы без сужения на выходе при $P_0 = 0,4$ и $0,5$ МПа, $d = 4$ и 14 мм, $L = 200$ мм.

Выбор и расчет характеристик компонентов и труб между регулятором и соплом зависят от длины труб, диаметра сопла и давления на входе в сопло, а также от коэффициента сопротивления потока или падения давления после построения схемы управления потоком в пневмосети.

Вторым этапом исследования является изучение характера движения дисперсных потоков в системе «сопло – форсунка» за распылительным устройством (разбрасывателем, ускорителем). Согласно проведенным исследованиям, при движении струи наблюдаются некоторые отклонения параметров распределения частиц по сечению потока от начальных, полученных на стадии его образования [5, 6]. Данный факт объясняется воздействием на частицы сил сопротивления воздуха. Кроме того, имеют место взаимные столкновения частиц, результатом которых являются изменение траекторий движения, а также дробление или слияние (при взаимодействии капель). Указанные факторы оказывают влияние на структуру и форму потоков по длине и сечению (рассматривается участок от вершины до начала зоны распада). Для учета этих изменений разработан метод корректировки дифференциальной функции распределения числа частиц по углам рассеивания, составленной для момента образования потока. Считается, что частицы при движении приобретают дополнительные отклонения от оси потока, величина которых изменяется в зависимости от пройденного пути. С учетом указанного, угол рассеивания частиц в потоке за устройством распыления можно определить:

$$\varphi_1^p = \varphi_1 + \varphi_1^{st} + \varphi_1^v, \quad (7)$$

где φ_1^{st} и φ_1^v – величины, учитывающие изменение угла рассеивания за счет межчастичных столкновений и аэродинамического взаимодействия с воздушной средой соответственно. Ввиду того, что мы рассматриваем лишь основную (прямолинейную) часть потока [7], влиянием сил тяжести в данном случае можно пренебречь. При расчете величины углового приращения φ_1^{st} принимаем следующие допущения: столкновения твердых частиц в одном потоке являются упругими и ввиду малых относительных скоростей не приводят к их разрушению; при столкновениях частицы получают угловые приращения, направленные в зону с меньшей концентрацией (от оси потока); величина углового смещения определяется с использованием понятия коэффициента восстановления скорости между частицами K_v , который с учетом полидисперсности потока [5] вычисляется по формуле (8):

$$K_v = \text{tg}(\varphi_1^{st}) / \text{tg} \varphi_1. \quad (8)$$

В связи с тем, что количество межчастичных столкновений пропорционально концентрации частиц в потоке и, следовательно, зависит от расстояния, в расчетах φ_1^{st} необходимо ввести корректирующий множитель, равный

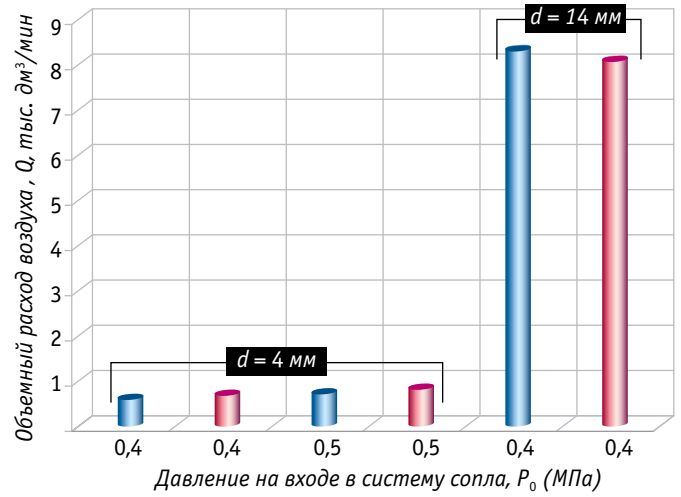


Рис. 4. Гистограмма расходных характеристик сопла и открытого сечения трубы при $L = 200$ мм

произведению $K_p S_L$. Тогда, с учетом (8) выражение для φ_1^{st} примет вид:

$$\varphi_1^{st} = \text{arctg}(K_v \cdot \text{tg} \varphi_1) (K_p S_L)^{(-1)}. \quad (9)$$

Таким образом, введение величины φ_1^{st} в выражение дифференциальной функции распределения числа частиц по углам рассеивания дает возможность осуществить ее корректировку в зависимости от расстояния от вершины потока. Угловое приращение вызвано влиянием сил аэродинамического взаимодействия потока с воздушной средой. Согласно работам [5–6] величину φ_1^v определим из выражения:

$$\varphi_1^v = S_L \cdot K_\phi \cdot K_{pv}. \quad (10)$$

Здесь S_L – расстояние от распылителя; K_ϕ – коэффициент формы частиц [5]; K_{pv} – коэффициент, учитывающий тип распылителя (лопастной, щеточный, канальный).

С учетом зависимостей (9), (10) выражение для определения угла рассеивания примет вид:

$$\varphi_1^p = \varphi_1 + \text{arctg}(K_v \cdot \text{tg} \varphi_1) (K_p S_L)^{(-1)} + S_L \cdot K_\phi \cdot K_{pv}. \quad (11)$$

Таким образом, приведенная методика дает возможность скорректировать вид дифференциальной функции распределения числа частиц по углам рассеивания и описать структуру потока за распыляющим устройством с учетом межчастичных столкновений и взаимодействия с газовой средой.

Вывод

После построения схемы управления можно рассчитать входную звуковую проводимость и критическое отношение давлений для каждого участка пневмосистемы согласно технической характеристике модели сопла. На базе данных исследований можно провести диагностику, модификацию и улучшение распределения давления и значений характеристик системы пневмосопла. После определения действительной затраты воздуха через рабочее сопло необходимо найти значение коэффициента затраты воздуха (степень

проводимости). Если отношение давлений равняется 0,8, степень пропущенной проводимости равна 1 при 0,9–1,5, а при 0,95 достигает 2,2. Это значит, что когда пропускная проводимость трубопровода в 1,5 раза больше проводимости сопла, отношение падения давления будет составлять 10 %, а если в 2 раза – то 5 %.

Поэтому необходимо выбрать трубопроводы такого размера, чтобы их проводимость была в 2 раза больше проводимости сопла. Размер сопла на трубопроводе выбирается в соответствии с расчетной пневматической схемой и условиями обдувания на объекте обработки.

Литература

1. A Guide to Improving the Performance of Your Drying and Blow-off Applications with WindJet // Catalog. – U.S.A.: Air Products Publishing. – 2014. – 20 p.
2. Донской А.С. Математическое моделирование процессов в пневматических приводах. – СПб.: Издание политехнического университета, 2009. – 121 с.
3. Донской А.С. Обобщенные математические модели элементов пневмосистем. – СПб.: СПГУТД, 2001. – 215 с.
4. Пажи Д.Г. Распылители жидкости / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
5. Kryvoplyas-Volodina L. Research of dynamic process in the pneumatic cylinder system of double action at the stable movement // Journal of food and packaging science technique and technologies. – 2014. – Volum 2. – Year III, № 4. – p. 138–142.
6. Dieck R.H. The determination of the sauter mean diameter of fuel nozzle sprays / R.H. Dieck, R.L. Roberts // Applied optics. – 1970, vol. 9, P.
7. Субханкулов Р.Р. Влияние геометрии каплеобразующего элемента, свойств и расхода жидкости на размер отрыва-

ющихся капель / Р.Р. Субханкулов, Р.Н. Маков, Р.Г. Сафиуллин // В Межвуз. сб.: Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств, КазИСИ. – Казань, 1997. – С. 86–90.

8. Технічні інформаційні ресурси [Електронний ресурс]. – Київ: CAMOZZI. – Режим доступу до каталога: <http://catalog.camozzi.ua> – Назва з екрану. *У*

Струменеві потоки в пакувальних технологіях

О.М. Гавва, д.т.н., Л.О. Кривопляс-Володіна, к.т.н.

Одним з етапів проектування пакувального обладнання є правильно підібрана і скомпонована система технологічних комунікацій. У статті проаналізована робота системи струменевих газових потоків на базі пневматичних приводів, наведені результати чисельного експерименту, виконаного на основі законів збереження енергії і матерії, визначені раціональні значення параметрів системи обдуву і витратні характеристики стисненого повітря. На базі проведених досліджень можна провести діагностику, модифікацію і поліпшення розподілу тиску та значень характеристик системи струменевих газових потоків.

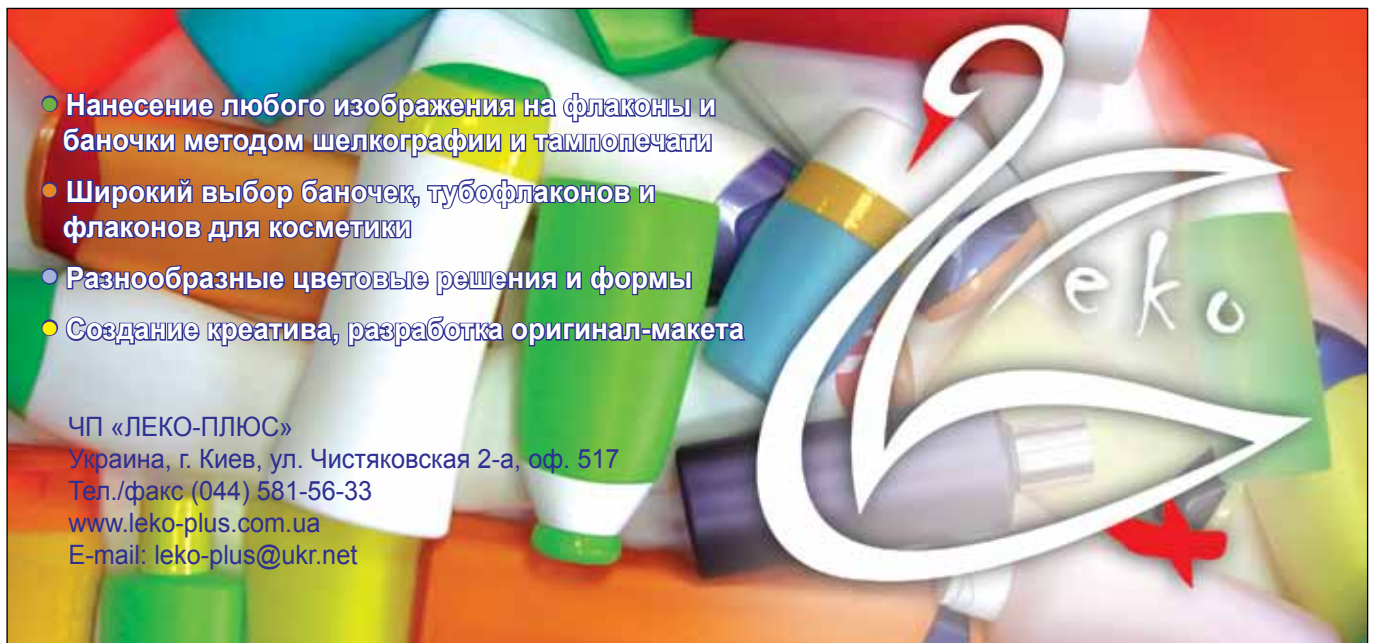
Ключові слова: повітря; сопло; труба; потік; енергія.

The jet flow in packaging technologies

A.N. Gava, Dr., L.A. Krivoplyas-Volodina, Ph.D.

One of the stages of designing of packaging equipment is correctly selected and configured the system process communications. In the article the analysis of the system of the jet of gas flows on the basis of pneumatic actuators, the results of numerical experiment, performed on the basis of laws of conservation of energy and matter, determined by the rational values of the parameters of the system blower and the flow characteristics of the compressed air. On the basis of the conducted researches it is possible to make a diagnosis, modification and improvement of the pressure distribution and values of the characteristics of the system blower.

Keywords: air; nozzle; pipe; flow; energy.



- Нанесение любого изображения на флаконы и баночки методом шелкографии и тампопечати
- Широкий выбор баночек, тубофлаконов и флаконов для косметики
- Разнообразные цветовые решения и формы
- Создание креатива, разработка оригинал-макета

ЧП «ЛЕКО-ПЛЮС»
Украина, г. Киев, ул. Чистяковская 2-а, оф. 517
Тел./факс (044) 581-56-33
www.leko-plus.com.ua
E-mail: leko-plus@ukr.net