

УДК 621.398.2:681.5

**МЕТОДЫ ПНЕВМОНИКИ В УПРАВЛЕНИИ СТРУЙНЫМИ ПОТОКАМИ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

Мурзинов Валерий Леонидович  
д.т.н., доцент  
*Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия*

Рассмотрены методы струйной пневмоавтоматики применительно (пневмоники) к системам транспортирования на воздушной подушке. Показано использование методов пневмоники при конструировании проточных каналов, обеспечивающих струйное управление на основе аэрогидродинамических эффектов. На основе гидродинамического расчета определены соотношения для определения в инженерных расчетах критических значений характеристик проточных элементов пневмоконвейера. Определено время переходного процесса системы переключения воздушных потоков

Ключевые слова: ПНЕВМОНИКА, СТРУЙНАЯ ПНЕВМОАВТОМАТИКА, ВОЗДУШНАЯ ПОДУШКА, СТРУЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

UDK 621.398.2:681.5

**METHODS OF PNEUMATIC AUTOMATION IN MANAGEMENT OF JET STREAMS IN SYSTEMS OF TRANSPORTATION ON THE AIR PILLOW**

Murzinov Valery Leonidovich  
Dr.Sci.Tech., associate professor  
*Voronezh State Academy of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia*

Methods of jet pneumatic automatics as applied (Pneumatic automation) to systems of transportation on an air pillow are considered. Use of methods pneumatic automation is shown at designing the flowing channels providing jet management on the basis of aero hydrodynamic effects. On the basis of hydro dynamical calculation parities for definition in engineering calculations of critical values of characteristics of flowing elements of the pneumoconveyor are determined. Time of transient of system of switching of air streams is determined

Keywords: PNEUMATIC AUTOMATION, JET PNEUMATIC AUTOMATICS, AIR PILLOW, JET MANAGEMENT

Пневмоника, являющаяся одной из ветвей техники автоматического управления, обладает рядом преимуществ по сравнению с электронной и электрической автоматикой, так и по сравнению с устройствами обычной пневмогидравлической автоматикой, имеющими подвижные части. Достоинствами пневмоники являются долговечность, радиационная стойкость, неподверженность действию электромагнитных полей, взрыво- и пожаробезопасность, сравнительно низкая стоимость, возможность работать на произвольных жидкостях и т.п. На элементах пневмоники могут строиться как относительно простые, так и сложные управляющие и вычислительные устройства, в которых все операции выполняются на потоках воздуха [1]. Принципы построения элементов пневмоники можно с успехом применить в системах управления транспортированием на воздушной подушке. Одним из устройств, использующих в качестве несущего элемента воздушную подушку, являются пневмоконвейеры [2].

Пневмоконвейеры в настоящее время применяются в различных отраслях промышленности, благодаря, таким своим достоинствам как, низкая металлоемкость, отсутствие контакта с транспортируемыми изделиями, отсутствие движущихся механических частей, возможность совмещения операции транспортирования с технологическими операциями нагрева, охлаждения, сушки, обжига. Основными потребителями энергии в пневматических конвейерах являются воздушные газодувки, обеспечивающие создание несущей воздушной подушки под транспортируемыми изделиями.

Одной из актуальных задач повышения эффективности работы пневмоконвейеров является снижение энергетических затрат путем уменьшения расхода воздуха, снижение уровня аэродинамического шума и запыленности в рабочей зоне при сохранении функциональных возможностей пневмоконвейеров [3]. Одним из путей решения этой задачи является разработка конструкции, обеспечивающей автоматическую подачу воздуха и, соответственно, создание несущей воздушной подушки только под транспортируемым изделием.

В настоящее время разработаны пневмоконвейеры с несущей воздушной прослойкой, обеспечивающие подачу воздуха только под транспортируемое изделие и отключающие подачу воздуха при отсутствии транспортируемых изделий [4]. Автоматическое управление подачей воздуха основано на аэрогидродинамическом эффекте взаимодействия плоской струи и стенки (рис.1).

На рис. 2 показана конструкция пневмоконвейера с автоматической подачей воздуха только под транспортируемое изделие [5]. Процесс создания воздушной подушки происходит следующим образом. При отсутствии над рабочим отверстием транспортируемого изделия струя воздуха, формируемая питающим соплом, распространяется прямолинейно и попадет в приемную камеру, по которой воздух поступает в систему

фильтрования и далее в газодувку. В рабочем отверстии создается разрежение за счет эжектирующей способности воздушной струи. Появление транспортируемого изделия над рабочим отверстием создает перепад давления, действующий на струю и способствующий переходу ее в отклоненное положение, показанное на рис.2в. Переход струи в прежнее положение происходит после того, как изделие сойдет с рабочего отверстия и откроет канал управления. По каналу управления в окрестность короткой стенки будет поступать воздух, и величина разрежения здесь уменьшится и струя перейдет в положение, показанное на рис.2б.

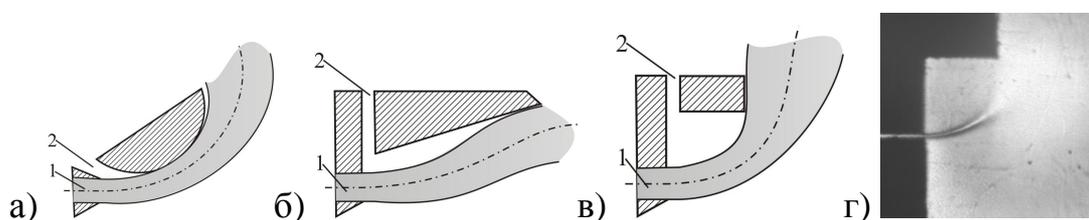
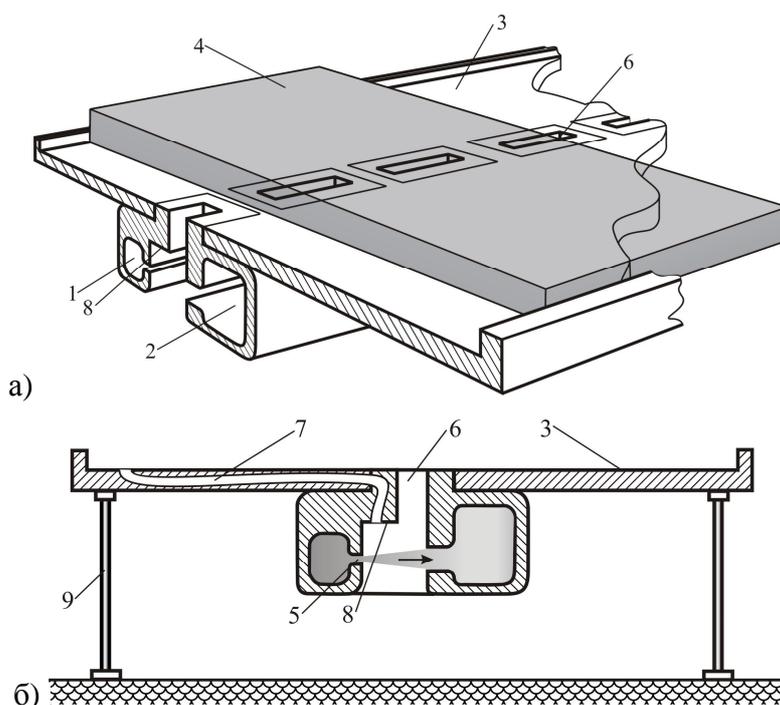


Рис 1. Взаимодействие плоской струи со стенкой: а) – цилиндрическая стенка; б) – плоская наклонная стенка; в) – короткая стенка; г) – фотография взаимодействия плоской струи с короткой стенкой полученная шлирен-методом (метод Теплера). 1 – питающее сопло, 2 – канал управления.



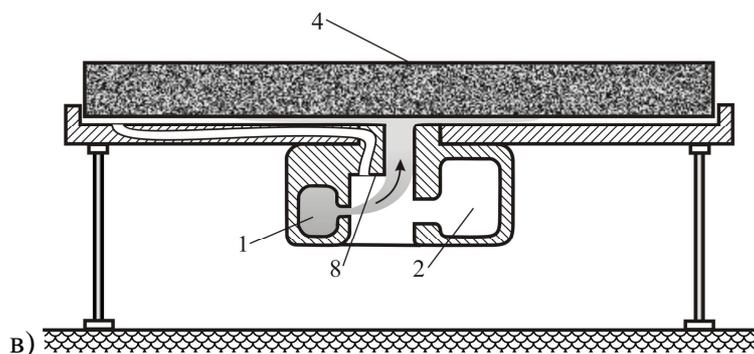


Рис.2. Пневмоконвейер с автоматической подачей воздуха только под транспортируемое изделие. а) часть несущей поверхности и транспортируемое изделие, б) сечение пневмоконвейера и положение воздушной струи в режиме холостого хода, в) сечение пневмоконвейера и положение струи в режиме создания воздушной подушки под транспортируемым изделием. 1 – пневматическая камера, 2 – приемная камера, 3 – несущая воздушная подушка, 4 – транспортируемое изделие, 5 – питающее сопло, 6 – рабочее отверстие, 7 – канал управления, 8 – короткая отклоняющая стенка, 9 – опорные стойки.

Течение воздуха в рабочих каналах этого пневмоконвейера, представляющих собой проточные элементы, имеет два режима: нагнетание и режим холостого хода. В режиме нагнетания создается несущая воздушная подушка. В режиме холостого хода воздушная струя скрыта полностью под несущей поверхностью пневмоконвейера. Это позволяет обеспечить достаточно эффективное экранирование аэродинамического шума струи элементами конструкции пневмоконвейера [6]. Переход из одного режима течения струйных потоков в другой происходит автоматически. Режим состояния воздушных потоков в рабочих каналах несущей поверхности определяется наличием или отсутствием транспортируемых изделий на пневмоконвейере. Рабочие отверстия под транспортируемыми изделиями находятся в режиме нагнетания, а рабочие отверстия, над которыми нет изделий, – в режиме холостого хода. Добиться таких функциональных возможностей пневмоконвейера удалось за счет использования аэродинамического эффекта взаимодействия плоской струи и короткой стенки. Сущность

этого эффекта заключается в том, что струйный поток может находиться в двух устойчивых положениях [5].

Нормальный режим работы этого пневмоконвейера возможен при правильно выбранных геометрических размерах, основными из которых являются ширина сопла, определяемая расходными характеристиками пневмоконвейера, высота короткой стенки и расстояние от питающего сопла до короткой стенки. Как показал анализ поведения плоских струй в окрестности короткой стенки, существует критическое значение этих величин, являющихся базовыми при расчете конструкции. Для определения этих базовых критических величин рассмотрим расчетную схему, представленную на рис.3, где приняты следующие условные обозначения:

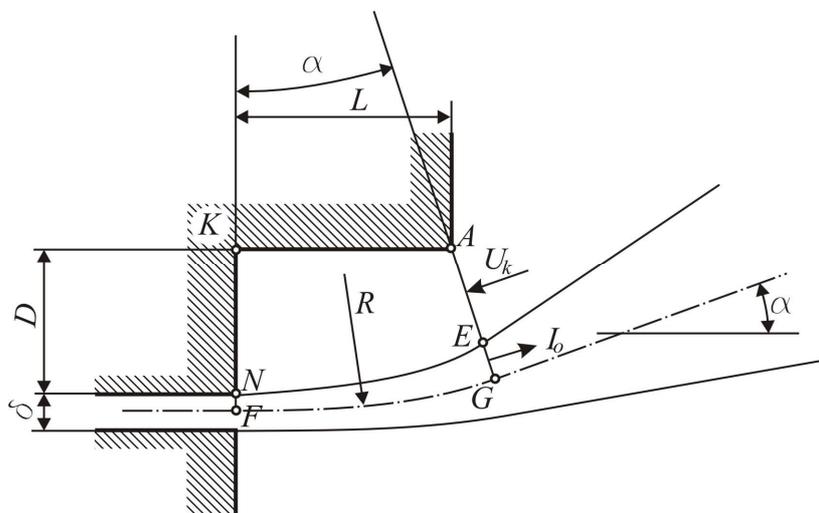


Рис. 3. Расчетная схема для определения критического расстояния между питающим соплом и короткой стенкой,  $\delta$  – ширина питающего сопла,  $D$  – расстояние между питающим соплом и короткой стенкой,  $L$  – высота короткой стенки,  $R$  – радиус кривизны оси струи на отрезке  $FG$ ,  $\alpha$  – угол отклонения оси струи от прямолинейного положения,  $U_k$  – скорость компенсирующего потока в сечении  $AE$ ,  $I_o$  – поток импульса струи в сечении  $EG$ .

Выделим контрольный объем  $FNKAEFG$ , для которого запишем уравнение неразрывности и уравнение изменения количества движения в интегральной форме с учетом традиционно принимаемых допущений для данного класса задач [1]

$$\frac{Q_o}{2} + Q_k - \frac{Q_s}{2} = 0, \quad (1)$$

$$-\Delta P \left( D + \frac{\delta}{2} \right) = \frac{1}{2} I_o (1 - \cos \alpha) - \rho U_k^2 A E \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $Q_o = U_o \delta$  – объемный расход воздуха в сечении питающего сопла,  $Q_k$  –

объемный расход воздуха в сечении  $AE$ ,  $Q_s = Q_o 0.385 \sqrt{\frac{2R}{\delta} \alpha + 2.3}$  – объемный

расход воздуха в струе,  $R = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + D + \frac{\delta}{2}$ ,  $\Delta P$  – давление разряжения в

контрольном объеме,  $I_o = \rho U_o^2 \delta$ ,  $\rho$  – плотность воздуха,

$U_k = \frac{Q_o}{AE} \left( 0.385 \sqrt{\frac{2 \cdot R}{\delta} \cdot \alpha + 2.3} - 1 \right)$ ,  $AE = R(1 - \alpha) - \frac{L}{\sin \alpha} - \frac{\delta}{2}$ . Переходя к

относительным величинам, и учитывая следующие замены

$$R_x = \frac{R}{L}, \quad D_x = \frac{D}{L}, \quad \delta_x = \frac{\delta}{L}, \quad AE_x = \frac{AE}{L}, \quad C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho U_o^2}, \quad C_d = \frac{I_o / R}{\frac{1}{2} \rho U_o^2}$$

уравнения (1) и (2) представим в виде

$$C_p = \frac{2\delta_x^2 \cos \alpha \left( 0.385 \sqrt{\frac{2R_x}{\delta_x} \alpha + 2.3} - 1 \right)^2}{AE_x \left( D_x + \frac{\delta_x}{2} \right)} - \frac{2\delta_x}{\left( D_x + \frac{\delta_x}{2} \right)} (1 - \cos \alpha), \quad (3)$$

$$C_d = \frac{2\delta_x}{R_x}. \quad (4)$$

где  $AE_x = R_x(1 - \alpha) - \frac{1}{\sin \alpha} - \frac{\delta_x}{2}$ ,  $R_x = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + D_x + \frac{\delta_x}{2}$ .

Величина критического расстояния  $D_x$  между питающим соплом и короткой стенкой определяется соотношением поперечных сил, действующих на струю. Силы, образованные разряжением в контрольном объеме, характеризуются коэффициентом давления  $C_p$ , определяемым формулой (3) и центробежные силы, стремящиеся уменьшить кривизну струи, характеризуются величиной  $C_d$ , представленной соотношением (4). По

формулам (3) и (4) построены графики функций двух переменных  $C_p = f_1(\alpha, D_x)$  и  $C_d = f_2(\alpha, D_x)$ , что показано на рис.4.

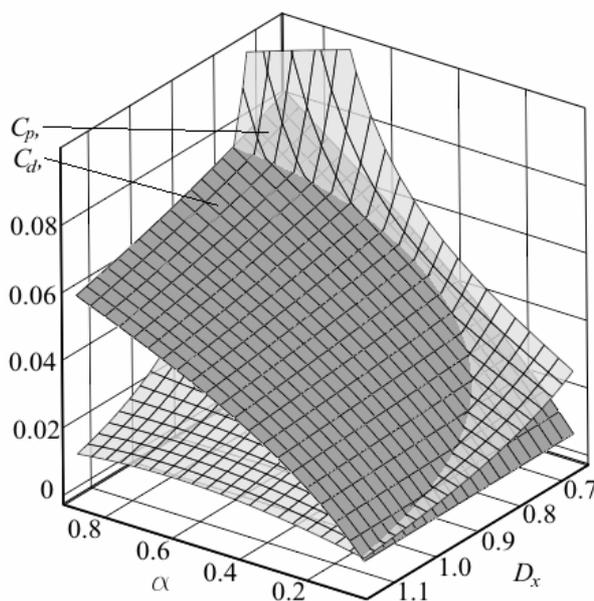


Рис.4. График зависимости коэффициента давления в циркуляционной  $C_p$  зоне и коэффициента давления вдоль струи  $C_d$  от угла отклонения струи и относительного расстояния до короткой стенки при  $\delta_x = 0.0689$ .

Анализ графиков этих функций показывает, что их пересечение определяет область возможных критических значений  $D_x$  и  $\alpha$ , которые могут быть найдены из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} C_p &= C_d, \\ \frac{d}{d\alpha}(C_p) &= \frac{d}{d\alpha}(C_d) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Система уравнений (5) с учетом (3) и (4) может быть решена методом последовательных приближений, с определением критических значений  $D_x$  и  $\alpha$ , при заданной ширине питающего сопла  $\delta_x$ . Рассматривая диапазон наиболее употребительных значений  $\delta_x$  и вычисляя для них критические значения  $D_x$  и  $\alpha$ , получаем массив значений  $D_x$  и

соответствующий ему массив значений  $\delta_x$ , аппроксимируя которые степенным рядом получим

$$D_x = 1.2312 - 6.52066\delta_x + 297753\delta_x^2 - 66.615\delta_x^3. \quad (6)$$

Однако, учитывая конечную величину длины щелевого отверстия и вводя экспериментальную поправку величиной (-0.32), получим зависимость

$$D_x = 0.9112 - 6.52066\delta_x + 297753\delta_x^2 - 66.615\delta_x^3, \quad (7)$$

график которой представлен на рис.5, из которого видно достаточно хорошее совпадение экспериментальных критических значений  $D_x$  со значениями, определенными зависимостью (7).

График на рис.5 может быть использован в инженерных расчетах системы струйного переключения воздушных потоков в пневмоконвейерах. В инженерных расчетах удобно использовать уравнение (7) для определения критических значений  $D_x$  в зависимости от  $\delta_x$ .

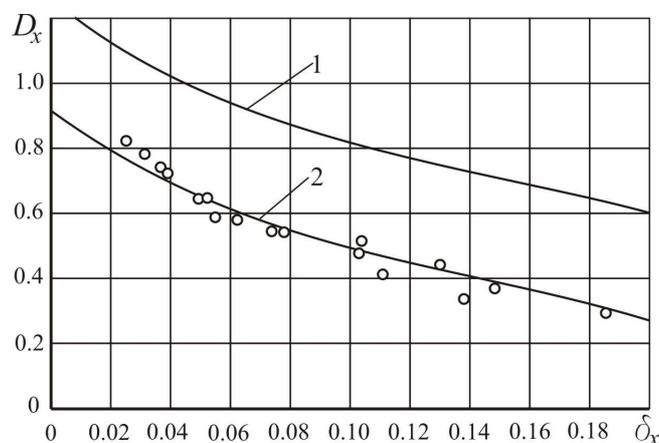


Рис. 5. Зависимость критических значений расстояния между питающим соплом и короткой стенкой от ширины питающего сопла. 1, 2 – функции, построенные, соответственно по уравнению (6) и (7). o – экспериментальные значения.

Кроме геометрических характеристик проточных элементов системы струйного управления воздушными потоками в пневмоконвейере, немаловажное значение имеет величина быстродействия системы

управления. Как отмечено в [1] по сравнению с электронными устройствами устройства струйной автоматики обладают лишь одним существенным недостатком – принципиально более низким быстродействием, ограниченным скоростью звука. Однако для пневмоконвейеров с автоматической подачей воздуха только под транспортируемое изделие это быстродействие оказывается вполне достаточным.

Была проведена скоростная киносъемка перехода струи воздуха в отклоненное положение при установлении критического значения расстояния  $D_x$ .

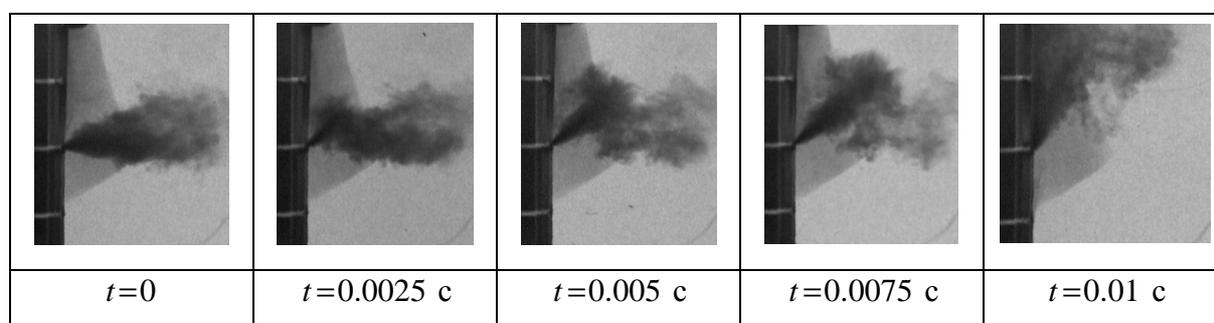


Рис. 6. Фрагмент скоростной киносъемки, показывающей этапы перехода струи в отклоненное положение при достижении критических значений расстояния между питающим соплом и короткой стенкой. Временной интервал между кадрами показан в секундах.

На рис.6 показан фрагмент киносъемки, соответствующей моменту переключения струйного потока. Анализ киносъемки показывает, что переход струи из прямолинейного движения в отклоненное происходит за одну сотую долю секунды. Для процессов транспортирования этого вполне достаточно, чтобы обеспечить гарантированную воздушную подушку под движущимися изделиями и сразу же переключать воздушный поток, как только изделие освободит рабочее отверстие в несущей поверхности пневмоконвейера.

Используя методы пневмоники, удалось разработать автоматическую систему управления, обеспечивающую подачу воздушного потока

для создания воздушной подушки только под транспортируемое изделие. Эта система реализует позиционный закон управления струйными потоками, при этом в конструктивном исполнении системы управления отсутствуют подвижные элементы. На основе гидродинамического расчета определены соотношения для определения в инженерных расчетах критических значений характеристик проточных элементов пневмоконвейера. Определено время переходных процессов системы управления.

## Литература

1. Залманзон Л.А. Специализированные аэрогидродинамические системы автоматического управления [Текст]. – М.: Наука, 1978. – 464 с.
2. Мурзинов В.Л. Снижение шума в устройствах транспортирования на воздушной подушке [Текст]. – Воронеж: Росинформресур, 2008. – 196 с.
3. А.с. №856945 (СССР). Пневмоконвейер/ В.Л. Мурзинов и др. – Оpubл. в Б.И.,23.08.1981, №31.
4. Мурзинов В.Л. Метод снижения аэродинамического шума в пневмоконвейерах [Текст] // Безопасность труда в промышленности. – 2007, №3. – С.54–58.
5. Патент 2294885 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 65 G 51/00. Питающее сопло пневмоконвейера [Текст] / Мурзинов В.Л. и др. – Оpubл. 10.03.2007 Бюл. №7.
6. Мурзинов В.Л. Снижение аэродинамического шума при реализации эффекта Коанда в пневматических конвейерах [Текст] / Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2005. – №1. – С. 33–35.