

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПНЕВМОНИКИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ

**ПАНКОВ Андрей Александрович**, д-р техн. наук, профессор<sup>1</sup>; e-mail: app.post@rambler.ru

**НЕЧАЕВ Григорий Иванович**, д-р техн. наук, профессор<sup>1</sup>; e-mail: logistikatt@mail.ru

**МИРОШНИКОВ Вадим Владимирович**, д-р техн. наук, зав. кафедрой, проректор по научно-учебной работе<sup>2</sup>; e-mail: prorectormw@mail.ru

**ЗАХАРЧУК Александр Сидорович**, д-р техн. наук, профессор<sup>3</sup>; e-mail: kaf\_energo\_sys@mail.ru

**БУДИКОВ Леонид Яковлевич**, д-р техн. наук, профессор<sup>4</sup>; e-mail: leonidbudikov@yandex.ru

**КОРОБЕЙНИКОВ Дмитрий Сергеевич**, аспирант<sup>1</sup>; e-mail: dimaktt@mail.ru

**МИХАЙЛОВА Ирина Геннадиевна**, соискатель<sup>1</sup>; e-mail: tilinstitut@gmail.com

<sup>1</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кафедра «Транспортные технологии», Луганск

<sup>2</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кафедра «Приборы», Луганск

<sup>3</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кафедра «Электротехнические системы электропотребления», Луганск

<sup>4</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кафедра «Аварийно-спасательные работы», Луганск

В работе показано, что особое место в системах управления транспортом занимают специализированные устройства, разработанные на основе применения элементов пневмоники (струйной техники). С использованием струйных и других проточных пневматических элементов и устройств оказывается возможным в определенных случаях наиболее рациональным образом выполнять функции автоматического управления. В некоторых эксплуатационных условиях этот способ управления является единственно возможным, например там, где не могут работать электронные системы управления. Анализ перспектив применения управляющих устройств на основе пневмоники привел к заключению о целесообразности их использования в системах автоматического управления некоторыми видами транспорта, в частности гидро- и пневмотранспортом, устройствами перемещения на воздушной прослойке, узлами и механизмами с аэрогидродинамическим рабочим телом. В связи с особыми требованиями, предъявляемыми к системам управления, кроме обычных стандартных элементов, должны применяться и нестандартные, в частности силовые аэрогидродинамические элементы пневмоники. Установлено, что одной из причин недостаточного применения элементов пневмоники в специализированных системах управления транспортом являются затруднения в разработке более эффективных конструкций силовых элементов. Процессы взаимодействия потоков в элементах пневмоники сложны и изучены недостаточно. Это составляет проблему выбора оптимальной геометрии элементов для получения их улучшенных характеристик. Для этого необходимо заменить эмпирические методы с их элементами случайности методами, имеющими более существенное обоснование. В настоящее время эффективное решение данной задачи возможно на основе имитационного моделирования аэрогидродинамических потоков с применением специальных программных средств. На основе имитационного моделирования в программной среде ANSYS Fluent проанализированы рабочие процессы и аэродинамические потоки в силовых элементах пневмоники. В результате моделирования разработаны элементы для применения в системах управления транспортом. В разработанных элементах оптимизированы размерные, энергетические характеристики и режимы работы. Применение элементов пневмоники, полученных в результате моделирования, позволяет улучшить технико-экономические характеристики специализированных систем управления транспортом.

**Ключевые слова:** струйная техника; специализированные системы управления; имитационное моделирование; силовой элемент пневмоники; взаимодействие потоков; процесс переключения.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-342-354

### ▼ Введение

Системы управления с элементами пневмоники находят все более широкое применение в транспортной отрасли. Известны струйные устройства пневмоники для защиты от

гидравлических ударов, предназначенные для систем трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов [1]. При разработке струйных вихревых клапанов для регулирования режимов движения нефти в трубопроводе возникли

затруднения в связи с тем, что для эффективной работы струйных вихревых клапанов необходимо, чтобы давление в каналах управления было больше давления на входе, что достигается дросселированием основного потока [2–6]. Однако при регулировании потока нефти в трубопроводах дросселирование основного потока в нужных пределах является недопустимым. Поэтому для регулирования подачи нефти и нефтепродуктов по трубопроводам разработаны струйные вихревые клапаны с подвижными стержнями в каналах управления, которые позволяют управлять потоками жидкости без дросселирования входного сечения клапана [1].

Получили развитие работы по использованию устройств и систем пневмоники для управления газопроводами. Для газовой промышленности специально разработаны струйные элементы системы «Янтарь», отличающиеся от элементов пневмоники общепромышленного назначения тем, что они предназначены для работы на открытом воздухе в условиях, когда температура окружающей среды изменяется в широких пределах [1].

Для управления движением железнодорожного транспорта на протяжении многих лет были традиционными только устройства электроавтоматики, они и сейчас имеют в данной области техники исключительное применение. Поэтому значительный интерес вызвала публикация [7], в которой сообщалось о работах по использованию пневмоники в системах железнодорожной автоматики. Основанием для проведения этих работ явилось то, что струйные элементы позволяют создавать схемы железнодорожной автоматики, более соответствующие требованиям безопасности движения. В качестве особенно ценного свойства элементов пневмоники отмечается возможность реализации основных функций без опасных отказов, так как в элементах пневмоники отсутствуют какие-либо детали, ощутимо изменяющие свои характеристики с течением времени. В статье представлены данные о разработке струйной схемы маршрутов приема (была взята для проработки схема маршрутов приема горловины малой станции). Сообщается об испытаниях струйного устройства управления стрелкой, проведенного в

реальных условиях эксплуатации на одной из станций железнодорожного узла. Устройством было безотказно произведено во время испытаний  $7,5 \cdot 10^6$  переключений. В указанной выше статье также говорится о возможности применения струйных элементов в локомотивных устройствах, таких, например, как скоростемеры и датчики пройденного пути. Для питания таких устройств предлагалось использование воздуха из тормозной магистрали.

На элементах пневмоники построен ряд устройств, предназначенных для управления железнодорожными составами специального назначения. На струйных элементах системы «Волга» построена аппаратура, осуществляющая управление стрелочными переводами с движущегося локомотива на подземном транспорте угольных шахт и рудников, и аппаратура для управления в шахтах дверями шлюзов, причем в этом случае управление производится из кабины машиниста движущегося локомотива или же с пульта поста управления [1].

Известны работы по вопросам использования струйных устройств в системах управления автоматическими гидромеханическими передачами автомобилей [1, 8, 9].

Особое место среди транспортных средств, для управления которыми целесообразно применять элементы пневмоники, занимают аппараты на воздушной подушке и средства пневмотрубопроводного транспорта.

Проведенный анализ перспектив применения в данной области устройств пневмоники привел к заключению о целесообразности их использования в системах автоматического управления следующими видами транспорта на воздушной подушке или воздушной прослойке: аппаратами на воздушной подушке, предназначенными для движения по бездорожью, и судами на воздушной подушке; внутризаводским пневмотранспортом, конвейерами для транспортирования поддонов с изделиями и отдельных изделий на воздушной прослойке, устройствами перемещения на воздушной прослойке станков при обработке громоздких изделий [1, 10, 11].

Ряд задач автоматического управления возникает и в области трубопроводного пневмотранспорта сыпучих материалов [12].

Анализ возможных применений пневмоники в системах перспективного высокоскоростного пассажирского наземного эстакадного и трубопроводного транспорта, проекты которого находятся сейчас в стадии предварительной разработки и обсуждения, привел к заключению о том, что здесь могут быть использованы устройства струйной автоматики, например при автоматическом управлении криогенными установками сверхпроводящих магнитов в транспортных средствах с электродинамической подвеской, приводимых в движение синхронными линейными двигателями [1].

В качестве примера использования элементов пневмоники в конструкциях транспортных средств можно представить разработку антиюзных систем управления торможением автомобиля (или систем динамической стабилизации) [1, 13–16]. Одна из таких экспериментальных систем, испытанная в Японии, была построена на основе стандартных струйных элементов производства фирмы Corning Glass Works.

Согласно приведенным данным, прошли сравнительные испытания автомобиль со стандартной системой торможения и автомобиль, оборудованный антиюзной системой на основе элементов пневмоники. Когда первый автомобиль, двигавшийся с начальной скоростью 100 км/ч, был резко заторможен, он прошел тормозной путь 130 м и развернулся на 90° относительно исходного направления движения. При таких же условиях торможения автомобиля, оборудованного струйной антиюзной системой, не произошло отклонения от исходного направления движения, а тормозной путь оказался даже несколько меньшим, чем в первом случае [1, 14–16].

Системы управления на основе элементов пневмоники все чаще применяются на объектах транспортной отрасли, где требуется сохранение работоспособности при повышенных температурах, резких колебаниях значений давления, ударах, вибрациях и прочих неблагоприятных воздействиях.

Для таких эксплуатационных условий создана система устройств агрегатно-интегральной струйной техники (АИСТ). Обладая

широкой функциональной номенклатурой струйных элементов, АИСТ обеспечивает интегральное исполнение агрегатных узлов и устройств [1, 17].

АИСТ успешно применяется для построения струйных регуляторов авиационных силовых установок. На элементах АИСТ созданы и выпускаются струйные регуляторы, которые эксплуатируются на газотурбинных двигателях, где регуляторы работают при температурах до +560 °С, значительных колебаниях давления питания (0,002–2,5 МПа) и окружающей среды, ударах, вибрациях, электромагнитных помехах и других неблагоприятных воздействиях [1, 17].

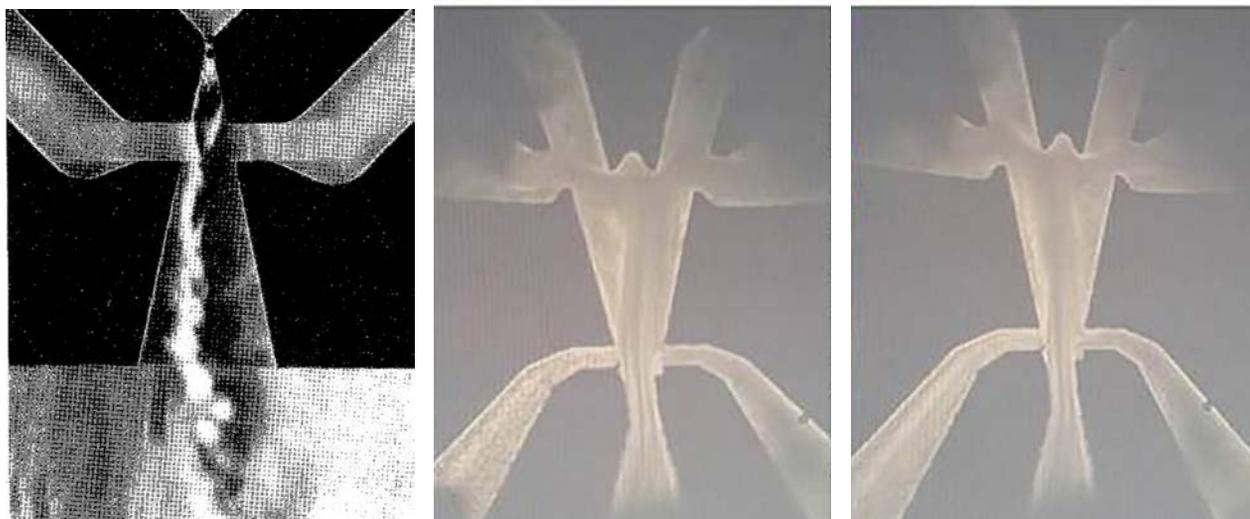
Цель работы: совершенствование геометрических и энергетических характеристик силовых элементов пневмоники для специализированных систем управления транспортом.

Задачи исследований:

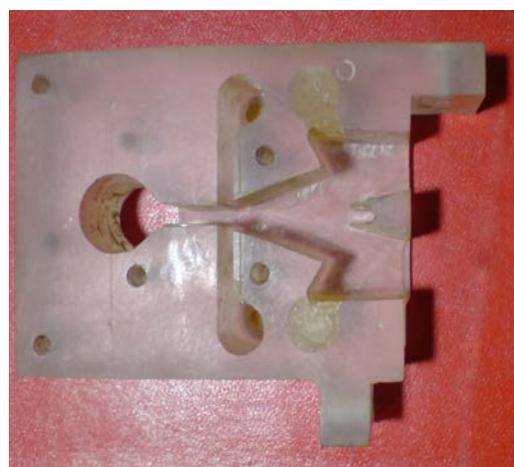
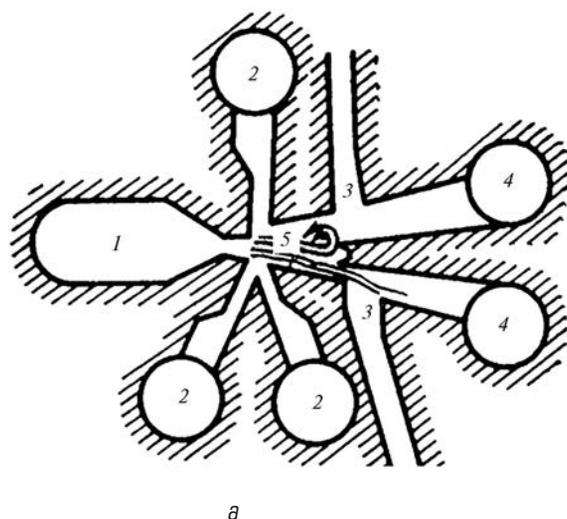
- осуществить анализ методов исследований рабочего процесса элементов пневмоники, моделирования и визуализации струйных течений и газовых потоков;
- рассмотреть аспекты и проанализировать опыт применения современных способов имитационного компьютерного моделирования элементов струйной техники;
- на основе имитационного компьютерного моделирования струйных устройств определить возможности улучшения размерно-энергетических характеристик силовых элементов пневмоники;
- провести стендовые экспериментальные исследования силовых элементов пневмоники, разработанных и усовершенствованных на основе имитационного компьютерного моделирования.

### **1. Анализ методов исследований рабочего процесса элементов пневмоники, моделирования и визуализации струйных течений и газовых потоков**

Одной из причин недостаточного применения элементов пневмоники в системах управления транспортом являются затруднения в разработке более эффективных конструкций элементов.



**Рис. 1.** Физическое моделирование течений в элементах пневмоники



**Рис. 2.** Элементы пневмоники:

*а* — схема элемента; 1 — канал питания; 2 — каналы управления; 3 — атмосферные каналы; 4 — выходные каналы; 5 — рабочая камера; *б* — силовой элемент, разработанный эмпирическим методом

При исследовании и разработке элементов пневмоники используются следующие методы [18, 19]:

- эмпирические методы проб и ошибок. Исследователь выбирает геометрические размеры, опираясь на аналогии, интуицию и представления о механизме явлений;
- экспериментальные методы, основанные на визуализации течений (физическое моделирование). Они заключаются в том, что потоки тем или иным способом делают видимыми, например через задымление или окрашивание [18, 20–23] (рис. 1). Изменяя геометрические размеры, достигают нужных направления и конфигурации потоков. Этот метод является

разновидностью метода проб и ошибок и отличается наглядностью;

- аналитические и статистические методы. Это выявление особенностей и аналитических закономерностей при передаче энергии струями в элементах, определение и оптимизация их размерно-энергетических характеристик [24–27].

Обычно струйный элемент (схема на рис. 2, *а*) создается для определенных задач. При этом предпочтение отдается эмпирическим и экспериментальным методам. Это позволяет за минимальное время создать элемент с удовлетворительными характеристиками. Например, на основе эмпирического метода проб и ошибок создан элемент на рис. 2, *б*.

Процессы взаимодействия потоков сложны и изучены недостаточно. Это составляет проблему выбора оптимальной геометрии элементов для получения их улучшенных характеристик. Для этого необходимо заменить эмпирические методы с их элементами случайности, методами, имеющими более существенное обоснование. В настоящее время эффективное решение данной задачи возможно на основе совершенствования методов имитационного моделирования и визуализации аэродинамических потоков с применением специальных программных средств [28–34].

## 2. Материалы и методы

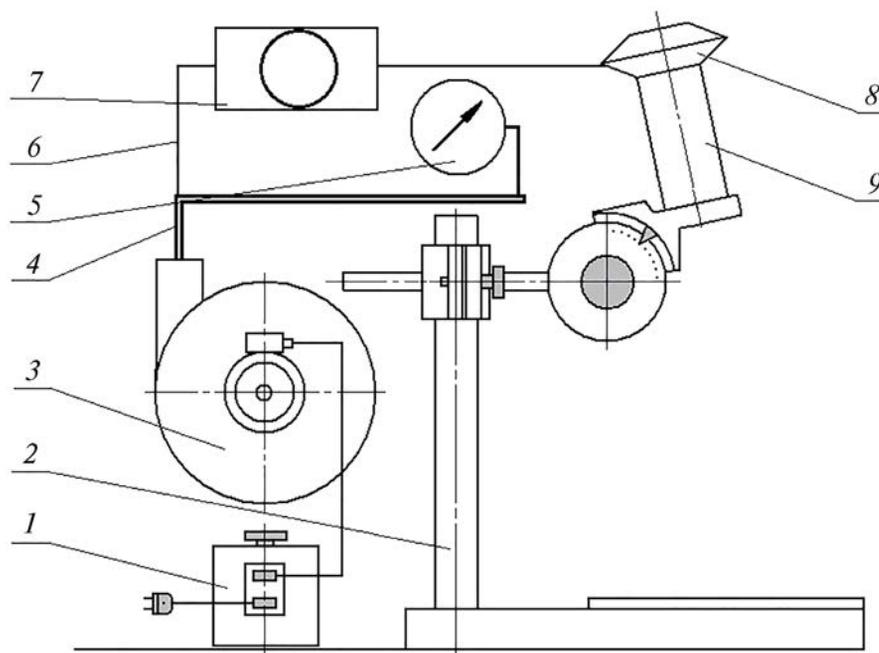
Для анализа работы элемента пневмоники использована программная среда ANSYS Fluent 15.0 [28, 29]. С ее помощью моделировались переходные процессы в камере элемента (рис. 5–8). Имитационное моделирование проводили в двумерной постановке. На основе рекомендаций, представленных в работах [26, 28–31], рассмотрен процесс переключения в камере элемента. Полученная картина распространена на силовые макроэлементы.

На входе в канал питания элемента моделировали избыточное давление 7–9 кПа и

температуру 300 К. Избыточное давление в управляющих каналах предполагалось постоянным. Таким образом, имитировался управляющий сигнал. На стенках элемента в процессе моделирования программно ставились условия герметичности, прилипания и тепловой изолированности.

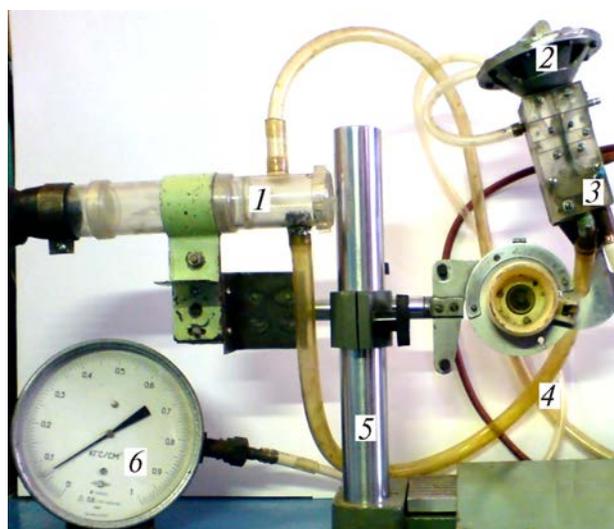
Для представленной на рис. 2, б конфигурации элемента пневмоники с базовыми размерами сопла питания шириной  $b = 2$  мм и глубиной (высотой)  $h = 17$  мм исследовался процесс переключения при подаче управляющих воздействий. В процессе моделирования сначала программно задавали геометрию элемента пневмоники и на ее основании моделировали процесс переключения силовой струи. По характеристикам течений определяли, удовлетворены ли требования к элементу. При необходимости геометрию корректировали и повторяли моделирование процесса переключения.

Следующим этапом было установление показателей работы моделируемого элемента. Для этого изготавливался элемент с полученными при моделировании оптимальными геометрическими показателями (рис. 9). Испытания элемента выполнялись на стендовом оборудовании (рис. 3, 4).



**Рис. 3.** Схема стенда для испытания элементов пневмоники:

- 1 — лабораторный автотрансформатор; 2 — штатив с монтажными кронштейнами;  
3 — источник сжатого воздуха; 4 — воздушный коллектор; 5 — манометр; 6 — воздухопроводы;  
7 — счетчик объема воздуха; 8 — дроссель; 9 — элемент пневмоники



а



б

**Рис. 4.** Оборудование для испытаний струйных элементов пневмоники:

- а — измерение давления питания элемента пневмоники; б — измерение объема воздуха;  
 1 — воздушный коллектор; 2 — дроссель;  
 3 — элемент пневмоники; 4 — воздухопроводы;  
 5 — штатив с монтажными кронштейнами;  
 6 — манометр; 7 — счетчик объема воздуха;  
 8 — лабораторный автотрансформатор

Лабораторным автотрансформатором на манометре 6 устанавливались значения давления питания  $P_{\text{П}} = 1\text{--}15$  кПа (рис. 4, а) и замерялись значения объема воздуха  $W$ , прошедшего через счетчик 7 за определенный временной период ( $t = 30$  с). Значения расхода воздуха элементом пневмоники рассчитывались по известной формуле ( $Q = W/t$ ) и заносились в табл. 1. На основе значений давления и расхода рассчитывалась мощность, потребляемая элементом.

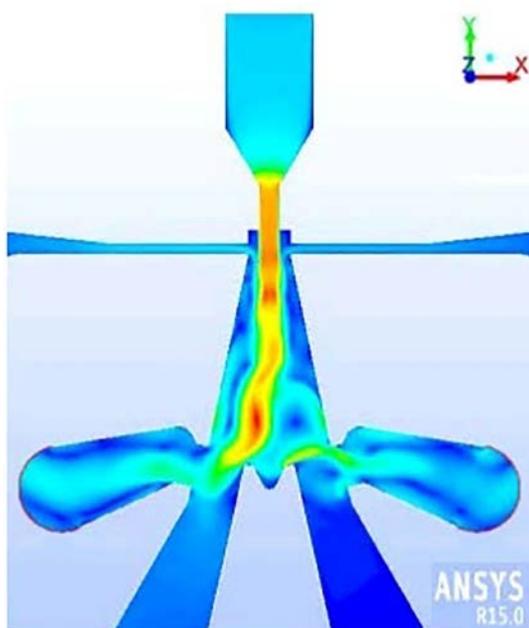
### 3. Результаты исследований

В моделируемой картине газодинамических процессов при заданной геометрии рассмотрены основные этапы переключения струи воздуха и распространения волн давления по аналогии с исследованиями авторов [28, 29], где представлен процесс установления струи в рабочей камере элемента пневмоники после подачи давления питания. По обе стороны струи идет процесс образования вихрей. Они формируются случайным образом. Рабочая среда частично эжектируется из каналов управления. Первичный поток струи питания сбрасывается в атмосферные окна и частично поступает в выходные каналы. Воздушная струя случайным образом устанавливается вдоль левой стенки рабочей камеры элемента. На рис. 5 можно видеть ядро струи и его основное направление. На рис. 5 также показано, как происходит повышение давления в левом выходном канале.

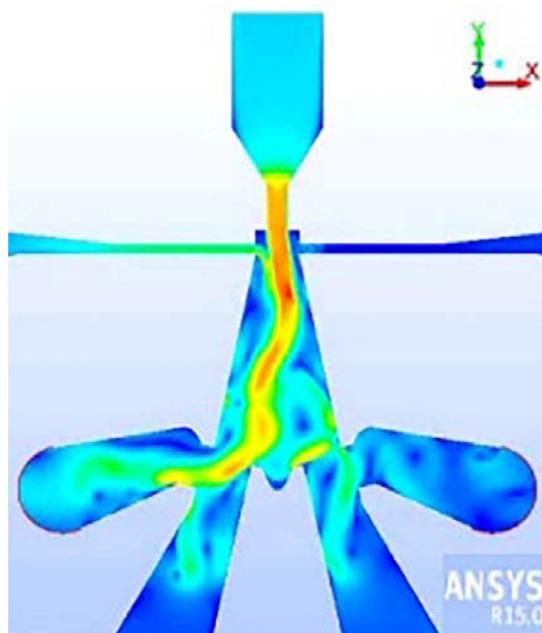
Далее давление управления подается в левый управляющий канал. Струя при этом начинает отклоняться вправо. На модели процесса (рис. 6) выявлено, что почти отклоненная вправо струя сбрасывается в левое атмосферное окно. Она пока не может преодолеть вихрь отраженного потока, формирующийся справа от нее. В правой выходной канал начинается выброс пульсаций давления, которые формирует пульсирующая рабочая среда отраженного потока. Пульсации могут быть источником ложных срабатываний элемента [28, 29].

На фрагменте модели процесса (рис. 7) видно, как струя снова устанавливается в «среднее» положение, отклонившись от левой стенки. Основной поток сбрасывается в левый атмосферный канал. По обе стороны струи формируются отраженные потоки. В обоих выходных каналах формируются пульсации давления. В рассматриваемый момент в левом выходном канале они преобладают. Управляющее давление и расход поступают в левый канал управления. Струя перемещается к правой стенке.

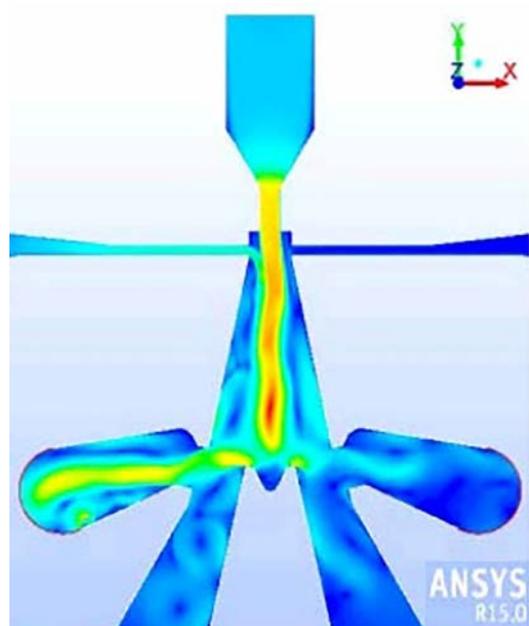
Затем струя восстанавливает свою целостность. Пульсации давления в левом выходном канале приводят к пульсациям давления в левом управляющем канале. Это вызывает нестабильность положения силовой струи



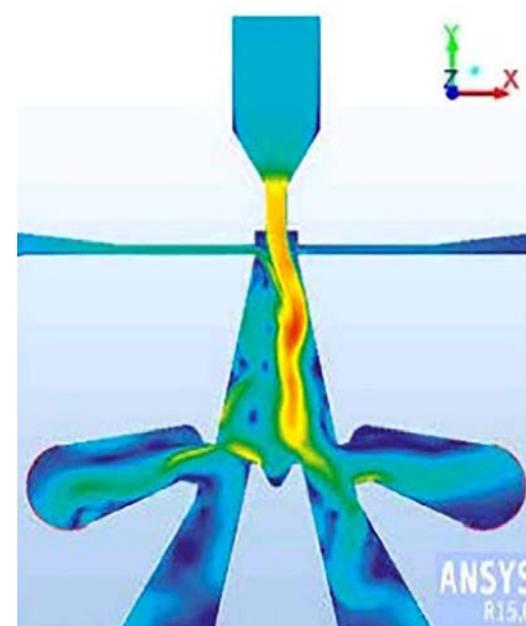
**Рис. 5.** Фрагмент повышения давления в левом выходном канале



**Рис. 6.** Момент сброса струи в левое атмосферное окно



**Рис. 7.** Фрагмент установления струи в среднем положении



**Рис. 8.** Фрагмент переключения струи к правой стенке

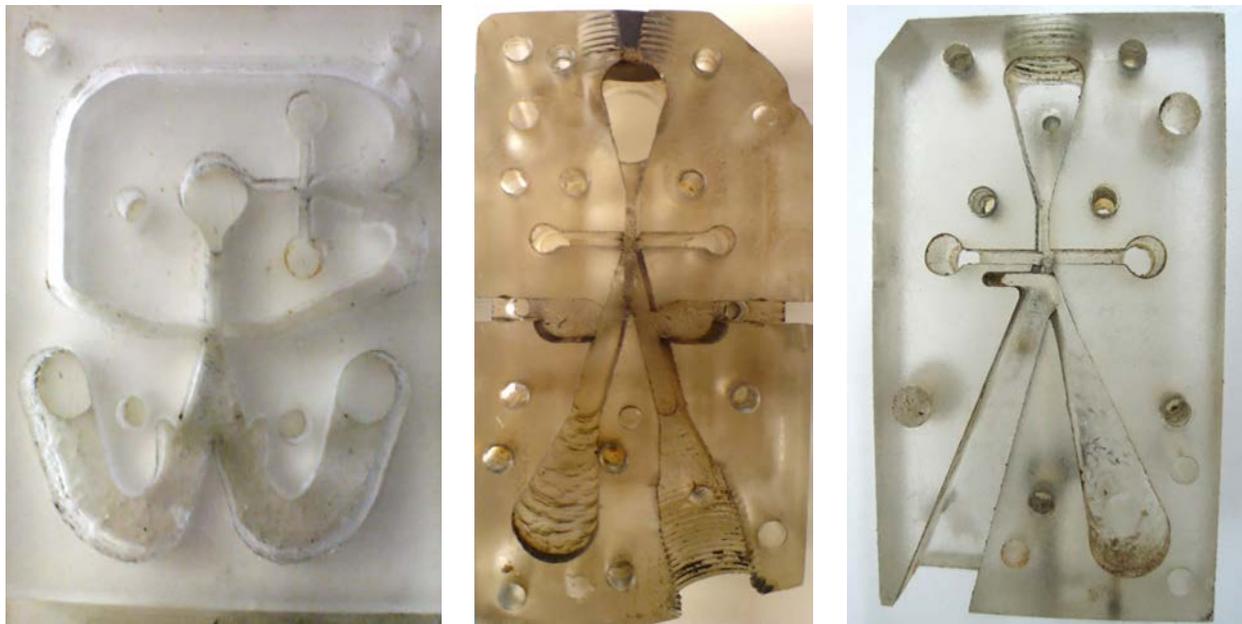
и начальные пульсации давления в правом выходном канале. Под воздействием давления в левом управляющем канале струя окончательно переходит к правой стенке струйного элемента, то есть происходит переключение (рис. 8).

Анализируя цикл переключения струи в камере элемента, можно отметить, что:

- полученная картина переключения отличается от эмпирической (на основе метода

проб и ошибок). Ранее принималась модель переключения, в которой не было полной картины возникновения пульсаций давления в процессе переключения. Это является существенным моментом при учете возникновения ложных срабатываний элементов пневмоники;

- при повышенных частотах переключение струи происходит также под влиянием



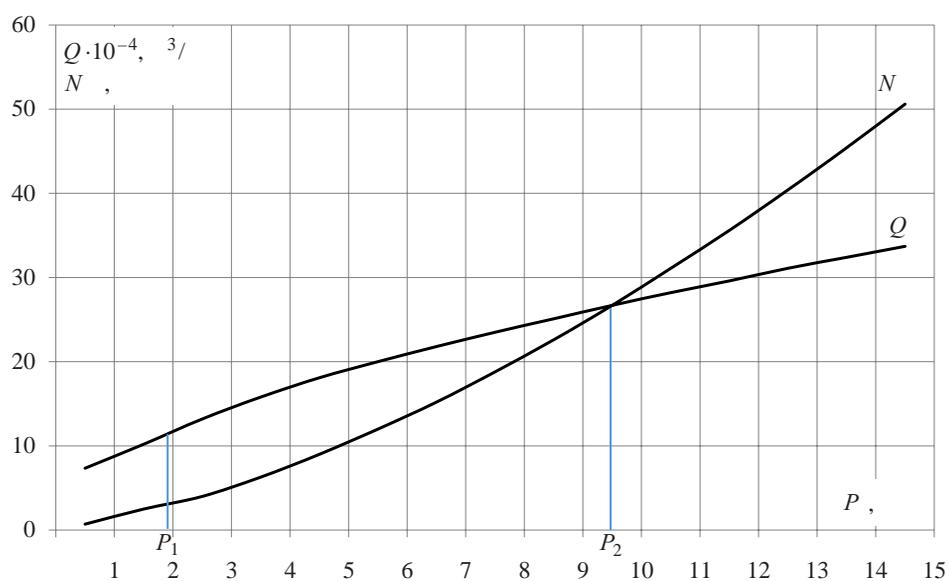
**Рис. 9.** Элементы, разработанные и изготовленные на основе моделирования:  
*а* — логический управляющий элемент; *б* — силовой бистабильный элемент;  
*в* — силовой моностабильный элемент-эжектор

**Таблица 1.** Зависимость расхода воздуха  $Q$  от давления питания  $P_{\text{п}}$  с площадью поперечного сечения сопла питания элемента пневмоники  $S_{\text{п}} = 34 \text{ мм}^2 (b \cdot h)$

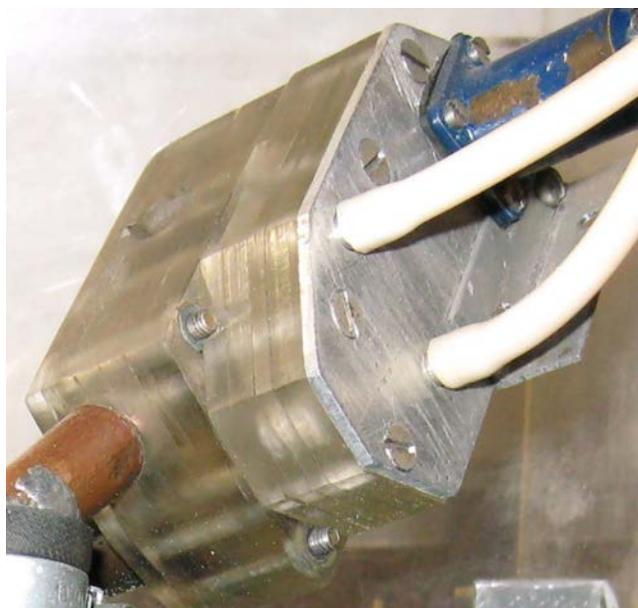
$P_{\text{п}}$ , кПа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$Q \cdot 10^{-4}, \text{ м}^3/\text{с}$	7,35	10,2	13,2	15,8	18,1	20,0	21,8	23,5	25,1	26,7	28,2	29,6	31,1	32,4	33,7

**Таблица 2.** Потребляемая мощность элемента  $N_{\text{эп}}$  в зависимости от давления питания  $P_{\text{п}}$

$P_{\text{п}}$ , кПа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$N_{\text{эп}}$ , Вт	0,7	2,5	4,0	6,3	9,0	12,0	15,2	18,8	22,6	26,7	31,1	35,6	40,4	45,4	50,6



**Рис. 10.** Зависимость расхода воздуха  $Q$  и мощности  $N_{\text{эп}}$  от давления питания  $P_{\text{п}}$  при площади сечения сопла питания элемента  $S_{\text{п}} = 34 \text{ мм}^2$



**Рис. 11.** Модуль системы автоматического управления на основе блока элементов пневмоники

выбросов расхода и давления, возникающих в выходных каналах элемента в процессе работы;

- определено, что фасонный рассекающий (углубление между выходными каналами, рис. 2, б) в силовых элементах не является обязательным. Это упрощает изготовление элементов.

Элементы пневмоники, разработанные и изготовленные на основе имитационного моделирования, представлены на рис. 9.

Результаты испытаний разработанного бистабильного элемента пневмоники представлены в табл. 1.

Потребляемая мощность элемента пневмоники:

$$N_{\text{эл}} = P_{\text{п}} \cdot Q, \text{ Вт.}$$

Полученные значения мощности для различных значений давления питания элемента пневмоники представлены в табл. 2.

Графические зависимости расхода питающего воздуха  $Q$  и мощности, потребляемой струйным элементом  $N_{\text{эл}}$ , в зависимости от давления питания  $P_{\text{п}}$  представлены на рис. 10.

Исходя из характера зависимостей, представленных на рис. 10, можно сделать вывод, что диапазон давлений питания усовершен-



**Рис. 12.** Экспериментальные варианты исполнения управляющих и силовых элементов пневмоники

ствованного силового элемента пневмоники  $P_1 - P_2 = 2,5 - 10$  кПа соответствует такому же диапазону для стандартных управляющих элементов пневмоники «Волга» [35, 36].

Вместе с управляющим элементом (рис. 9, а) силовой бистабильный элемент собирается в моноблок (рис. 11), после чего присоединяется к потребителю.

В настоящее время для применения транспортной отрасли далее разрабатываются и совершенствуются бистабильные элементы пневмоники на основе методологии, представленной в данной работе (рис. 12).

Для применения в трубопроводном транспорте также исследуется применение другого класса устройств струйной техники — вихревых клапанов [37–39].

### Заключение

В процессе анализа методологии исследования элементов пневмоники установлено, что процессы взаимодействия газодинамических струй и потоков в них сложны и изучены недостаточно. Поэтому геометрические характеристики силовых элементов пневмоники, рассчитанные теоретически или выбранные

в соответствии с рекомендациями для управляющих элементов, не позволяют обеспечить достаточно качественную работу элемента. Это является одной из причин недостаточного применения элементов пневмоники в системах управления транспортом, а также разработки более эффективных конструкций элементов. Необходимо принимать во внимание гидродинамическое подобие и масштабные факторы, которые устанавливаются путем моделирования.

Полученная в результате имитационного моделирования картина аэродинамических потоков показывает, что необходима и возможна оптимизация геометрических параметров применяемых силовых элементов пневмоники. В процессе исследований в моделируемой картине газодинамических процессов в камере элемента при заданной ее геометрии выделены основные этапы переключения струи рабочего тела и распространения волн давления. Установлено, что важным параметром, который необходимо оптимизировать, является длина рабочей камеры элемента. Для улучшения процесса переключения необходимо и достаточно переключать только ядро струи, а не развитую расширенную струю с завихрениями, которая имеет эжекционные турбулентные составляющие.

По результатам имитационного моделирования выявлено возникновение пульсаций давления в выходных каналах. Вследствие этого процесс переключения может повторяться. Зафиксирован разрыв основной струи и возникновение вредных пульсаций давления. Это является еще одним источником ложных срабатываний элемента пневмоники.

В отличие от ранее представленных в различных работах результатов теоретических и экспериментальных исследований установлено, что наличие фасонного рассекателя для силовых элементов пневмоники не является обязательным. Это упрощает их изготовление.

Устранение негативных эффектов в работе элементов пневмоники позволило улучшить их характеристики, что расширит применение элементов в специализированных системах транспортной автоматики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с повышением энергетической эффективности элементов пневмоники. Улучшить пока-

затели энергетической эффективности возможно использованием более совершенных способов передачи энергии в струйных устройствах. ▲

### Библиографический список

1. Залманзон Л. А. Специализированные аэрогидродинамические системы автоматического управления / Л. А. Залманзон. — М.: Наука, 1978. — 464 с.
2. Семин Д. А. Влияние типа и размера расчетных сеток на точность расчета течений в вихрекамерных нагнетателях / Д. А. Семин, А. С. Роговой // Вісник НТУ «ХП». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. — 2016. — № 41(1213). — С. 70–77.
3. Роговой А. С. Особенности режимов работы вихрекамерных нагнетателей / А. С. Роговой // Вестник ХНАДУ. — 2016. — Вып. 75. — С. 120–128.
4. Левашов А. Н. Снижение потерь перекачиваемой среды в вихрекамерных нагнетателях / Д. А. Семин, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов и др. // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. — 2017. — № 4(6). — Ч. 2. — С. 196–199.
5. Левашов Я. Н. Экспериментальные исследования рабочих характеристик вихревых клапанов различных модификаций / Д. А. Семин, Я. Н. Левашов, А. Н. Левашов // Вестник Луганского Национального университета имени Владимира Даля. — 2019. — № 11(29). — С. 113–118.
6. Левашов Я. Н. Математическое и физическое моделирование течений в вихревых клапанах / Д. А. Семин, Я. Н. Левашов, А. Н. Левашов и др. // Вестник Луганского Национального университета имени Владимира Даля. — 2021. — № 6(48). — С. 199–203.
7. Акопов А. А. Струйные элементы в устройствах железнодорожной автоматики / А. А. Акопов, Е. Н. Розенберг, Г. И. Лобынцев // Автоматика, телемеханика и связь. — 1976. — № 7. — 48 с.
8. Gau L. P. Automobile application of fluidics / L. P. Gau // Fluidics Quarterly. — Vol. 3. — Iss. 2, April 1971.
9. Kawabata M. Automatic transmission control system / M. Kawabata. Pat. US № 3592083 cl. 74/868, appl. 07.07.1969, publ. 13.07.1971.
10. Мурзинов В. Л. Методы пневмоники в управлении струйными потоками в системах транспортирования на воздушной подушке / В. Л. Мурзинов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (КубГАУ). — 2011. — № 74(10). — С. 25–34.
11. Мурзинов В. Л. Снижение аэродинамического шума при реализации эффекта Коанда в пневматических конвейерах / В. Л. Мурзинов // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. — 2005. — № 1. — С. 33–35.
12. Левашов А. Н. Моделирование работы вихрекамерного нагнетателя в системах трубопроводного пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих грузов / Д. А. Семин, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. — 2022. — № 4(58). — С. 239–245.
13. Romiti A. Fluidic-pneumatic antiskid system for cars / A. Romiti, G. Belforte // Preprints of the 2<sup>nd</sup> IFAC Symposium on Fluidics. IFAC Technical Committee on Components. Fluidics Quarterly. — 1974. — Vol. 6. — Iss. 1. — Pp. 73–77.

14. Tsuchiya K. Governor-type and inertia-type sensors of an anti-lock brake control system / K. Tsuchiya, S. Izawa, S. Kitazawa et al. // Papers of the 9th Fluidics Symposium, Hamamatsu, Japan, SICE, 1974. — Pp. 41–44.
15. Tsuchiya K. Anti-lock brake control system utilizing fluidic amplifiers / K. Tsuchiya, S. Kasagi, S. Izawa et al. // Fluidics Quarterly. — 1975. — Vol. 7. — Iss. 1. — Pp. 88–93.
16. Tsuchiya K. Anti-lock brake control system utilizing fluidic amplifiers / K. Tsuchiya, S. Kasagi, S. Izawa et al. // Papers of the 8th Fluidics Symposium, Okayama, Japan, SICE, 1973. — Pp. 24–28.
17. Касимов А. М. Развитие пневматических средств автоматизации / А. М. Касимов // Труды конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (Москва, октябрь 2010 г.). — С. 000640–000652.
18. Градецкий В. Г. Струйная пневмогидроавтоматика / В. Г. Градецкий, А. Д. Чудаков, В. И. Чернышев. — М.: Мир, 1966. — 382 с.
19. Лебедев И. В. Элементы струйной автоматики / И. В. Лебедев, С. Л. Трескунов, В. С. Яковенко. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.
20. Lighthill M. J. Physiological fluid dynamics: a survey / M. J. Lighthill // Journal of Fluid Dynamics. — 1972. — Iss. 52(3). — Pp. 475–497. — DOI: 10.1017/S0022112072001557.
21. Shimizu S. Discrete-vortex simulation of a two-dimensional turbulent jet / S. Shimizu // Bulletin JSME. — 1986. — Vol. 29(254). — Pp. 2440–2446. — DOI: 10.1299/JSME1958.29.2440.
22. Балабанов А. В. Инструментальные средства компьютерного и физического моделирования для разработки интегральных струйных устройств / А. В. Балабанов, А. М. Касимов, А. Е. Артамонов и др. // Труды 15-й международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта», (CAD/CAM/PDM-2015). — М.: ИПУ РАН, 2015. — С. 83–86.
23. Чаплиц А. Д. Визуализация газовых потоков во внутренних каналах: методы и результаты экспериментальных исследований / А. Д. Чаплиц, А. И. Астапов: Нац. акад. наук Украины, Нац. космическое агентство Украины, Ин-т технической механики. — Днепрпетровск: Ин-т технической механики, 2007. — 209 с.
24. Chorin A. J. Numerical study of slightly viscous flow / A. J. Chorin // Journal of Fluid Mechanics. — 1973. — Vol. 57(4). — Pp. 785–796. — DOI: 10.1017/S0022112073002016.
25. Аулин В. В. Аналитическое определение характеристик силовых струйных элементов автоматизированных высевающих систем / В. В. Аулин, М. И. Черновол, А. А. Панков // Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. — 2018. — Vol. 9. — Iss. 3. — Pp. 33–38. — DOI: 10.31548/me2018.03.033.
26. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники / Л. А. Залманзон. — М.: Наука, 1969. — 508 с.
27. Волков К. Н. Численное моделирование взаимодействия поперечной струи со сверхзвуковым потоком с использованием различных моделей турбулентности / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, М. С. Яковчук // Прикладная механика и техническая физика. — 2015. — Т. 56. — № 5. — С. 64–75. — DOI: 10.15372/PMTF20150505.
28. Бурков Ю. Г. Моделирование процессов переключения струйного элемента / Ю. Г. Бурков, В. А. Горюнов, Д. А. Дудников и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2015. — Т. 156. — № 1. — С. 48–52.
29. Дудников Д. А. Численный метод моделирования рабочего процесса струйного бистабильного элемента / Д. А. Дудников, А. Ю. Чулюнин, О. А. Пашков и др. // CADFEM Review. — 2014. — № 1. — С. 35–39.
30. Ильина Т. Е. Проектирование элемента струйной системы управления газостатическим подшипником / Т. Е. Ильина, Н. В. Продан // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2015. — Т. 15. — № 5. — С. 921–929.
31. Артамонов Е. И. Автоматизированное проектирование и изготовление устройств автоматики на элементах струйной техники / Е. И. Артамонов, А. М. Касимов, А. В. Балабанов и др. // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2013). Труды 13-й международной конференции ИПУ РАН. Москва, 15–17 октября 2013. — С. 36–40.
32. Чаплиц А. Д. Совершенствование метода визуализации газовых потоков во внутренних каналах технических устройств / А. Д. Чаплиц // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 6/7(60). — С. 54–58. — DOI: 10.15587/1729-4061.2012.5562.
33. Булат П. В. Визуализация течений с сильными и слабыми газодинамическими разрывами в вычислительной газовой динамике / П. В. Булат, К. Н. Волков, М. С. Яковчук // Вычислительные методы и программирование. — 2016. — Т. 17. — С. 245–257. — DOI: 10.26089/NumMet.v17r323.
34. Волков К. Н. Методы и концепции визуализации вихревых течений в задачах вычислительной газовой динамики / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина и др. // Вычислительные методы и программирование. — 2016. — № 17. — С. 81–100. — DOI: 10.26089/NumMet.v17r109.
35. Кулешова Н. А. Атлас конструкций элементов схем пневмоавтоматики. Ч. 2. Элементы струйной системы «Волга» / Н. А. Кулешова, Ю. Д. Власов, И. С. Леладзе. — М.: Ротапринт МАДИ-ТУ, 1995. — 34 с.
36. Струйные логические элементы и устройства программного управления станками и промышленными роботами. Каталог. — М.: НИИмаш, 1979. — 71 с.
37. Роговой А. С. Применение вихрекамерных нагнетателей в гидро- и пневмотранспортных системах / А. С. Роговой // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. — 2016. — № 3(78). — С. 65–70.
38. Левашов А. Н. Совершенствование рабочих характеристик вихрекамерных нагнетателей для пневмотранспортных систем мелкодисперсных сыпучих грузов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Н. Левашов. — Луганск, 2022. — 22 с.
39. Левашов Я. Н. Повышение эффективности трубопроводных транспортных систем снижением энергозатрат на управление вихревой арматурой: автореф. дисс. канд. техн. наук / Я. Н. Левашов. — Луганск, 2022. — 22 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 342–354  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-342-354

### Modeling and Experimental Research of Pneumatic Elements for Transportation Control Systems

#### Information about authors

**Pankov A. A.**, Doctor in Engineering, Professor<sup>1</sup>. E-mail: app.post@rambler.ru

**Nechaev G. I.**, Doctor in Engineering, Professor<sup>1</sup>. E-mail: logistikatt@mail.ru

**Miroshnikov V. V.**, Doctor in Engineering, Head of the Department, Vice-Rector for Scientific and Educational Work<sup>2</sup>. E-mail: prorectormv@mail.ru

**Zaharchuk A. S.**, Doctor of Engineering, Professor<sup>3</sup>. E-mail: kaf\_energo\_sys@mail.ru

**Budikov L. Ya.**, Doctor of Engineering, Professor<sup>4</sup>. E-mail: leonidbudikov@yandex.ru

**Korobejnikov D. S.**, Postgraduate Student<sup>1</sup>. E-mail: dimaktt@mail.ru

**Mihajlova I. G.**, PhD Candidate<sup>1</sup>. E-mail: tilinstitut@gmail.com

<sup>1</sup>Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Department “Transport Technologies”, Lugansk

<sup>2</sup>Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Department “Devices”, Lugansk

<sup>3</sup>Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Department “Electrotechnical Power Consumption Systems”, Lugansk

<sup>4</sup>Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Department of Emergency Rescue Operations, Lugansk

**Abstract:** The article demonstrates that specialized devices play a significant role in transportation control systems, and they are developed based on the application of pneumatic elements (pneumatics). By using fluidic and other flow-based pneumatic elements and devices, it becomes possible, in certain cases, to perform automatic control functions in the most rational manner. In certain operating conditions, this method of control is the only feasible option, for example, where electronic control systems cannot operate. The analysis of the prospects for the use of control devices based on pneumatics has led to the conclusion that it is advisable to use them in automatic control systems for certain types of transportation. This is particularly relevant for hydro- and pneumatic transport, devices for moving on an air cushion, and mechanisms with aerohydrodynamic operating fluid. Due to the specific requirements imposed on control systems, besides standard elements, non-standard elements, particularly power aerohydrodynamic pneumatic components, should be employed. It has been determined that one of the reasons for the limited use of pneumatic components in specialized transportation control systems is the challenges in developing more effective designs for power elements. The processes of flow interaction in pneumatic components are complex and not sufficiently studied. This poses a problem when selecting the optimal geometry of components to achieve improved characteristics. To achieve this, it is necessary to replace empirical methods with their elements of randomness with methods that have a more substantial justification. Currently, an effective solution to this problem is possible through the use of simulation modeling of aerohydrodynamic flows using specialized software tools. Based on simulation modeling within the ANSYS Fluent software environment, the operational processes and aerodynamic flows in pneumatic power elements have been analyzed. As a result of the modeling, elements have been developed for use in transportation control systems. The developed elements have optimized dimensional, energy-related characteristics, and operational modes. The application of pneumatic elements obtained through modeling allows for the improvement of the technical and economic characteristics of specialized transportation control systems.

**Keywords:** pneumonics; specialized control systems; simulation modeling; pneumatic power element; flow interaction; switching process.

#### References

- Zalmanzon L. A. Spetsializirovannye aerogidrodinamicheskie sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Specialized aerohydrodynamic automatic control systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 1978, 464 p. (In Russian)
- Semin D. A., Rogovoy A. S. Vliyanie tipa i razmera raschetnykh setok na tochnost' rascheta techeniy v vikhrekamernykh nagnetatelyakh [Influence of the type and size of computational grids on the accuracy of flow calculations in vortex chamber pumps]. *Visnyk NTU “KhPI”. Seriya: Gidravlichni mashyny ta hidroahregaty* [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Series: Hydraulic Machines and Hydroaggregates]. 2016, Iss. 41(1213), pp. 70–77. (In Ukrainian)
- Rogovoy A. S. Osobennosti rezhimov raboty vikhrekamernykh nagnetatelye [Features of the operation modes of vortex chamber pumps]. *Vestnik KhNADU* [Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University]. 2016, Iss. 75, pp. 120–128. (In Russian)
- Semin D. A., Levashov A. N., Levashov Ya. N. Snizhenie poter' perekachivaemoi sredy v vikhrekamernykh nagnetatelyakh [Reduction of losses of the pumped medium in vortex chamber pumps]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Luhansk National University named after Vladimir Dahl]. 2017, Iss. 4(6), Part 2, pp. 196–199. (In Russian)
- Levashov Ya. N., Semin D. A., Levashov A. N. Eksperimental'nye issledovaniya rabochikh kharakteristik vikhrevykh klapaov razlichnykh modifikatsii [Experimental studies of the working characteristics of vortex valves of various modifications]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Luhansk National University named after Vladimir Dahl]. 2019, Iss. 11(29), pp. 113–118. (In Russian)
- Levashov Ya. N., Semin D. A., Levashov A. N. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie techenii v vikhrevykh klapanakh [Mathematical and physical modeling of flows in vortex valves]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Luhansk National University named after Vladimir Dahl]. 2021, Iss. 6(48), pp. 199–203. (In Russian)
- Akopov A. A., Rozenberg E. N., Lobintsev G. I. Struynnye elementy v ustroystvakh zheleznodorozhnoy avtomatiki [Jet elements in railway automation devices]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz'* [Automation, Remote Control and Communications]. 1976, Iss. 7, 48 p. (In Russian)
- Gau L. P. Automobile application of fluidics. *Fluidics Quarterly*. April 1971, vol. 3, Iss. 2.
- Kawabata M. Automatic transmission control system. Pat. US 3592083 cl. 74/868, appl. 07.07.1969, publ. 13.07.1971.
- Murzinov V. L. Metody pnevmoniki v upravlenii struynnymi potokami v sistemakh transportirovaniya na vozdukhnoy podushke [Pneumatic methods in controlling jet flows in air cushion transport systems]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (KubGAU)* [Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University]. 2011, Iss. 74(10), pp. 25–34. (In Russian)
- Murzinov V. L. Snizhenie aerodinamicheskogo shuma pri realizatsii efekta Koanda v pnevmaticheskikh konveyerakh [Reduction of aerodynamic noise during the implementation of the Coanda effect in pneumatic conveyors]. *Nauchnyi vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Scientific Bulletin of VGASU. Construction and architecture]. 2005, Iss. 1, pp. 33–35. (In Russian)
- Levashov A. N., Semin D. A., Levashov Ya. N. Modelirovanie raboty vikhrekamernogo nagnetatelya v sistemakh truboprovodnogo pnevmotransporta melkodiespersnykh sypuchikh gruzov [Modeling of the operation of a vortex chamber compressor in systems of pipeline pneumatic transport of finely dispersed bulk materials]. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Luhansk National University named after Vladimir Dahl]. 2022, Iss. 4(58), pp. 239–245. (In Russian)

13. Romiti A., Belforte G. Fluidic-pneumatic antiskid system for cars. Preprints of the 2nd IFAC Symposium on Fluidics. IFAC Technical Committee on Components. Fluidics Quarterly, 1974, vol. 6, Iss. 1, pp. 73–77.
14. Tsuchiya K., Izawa S., Kitazawa S. et al. Governor-type and inertia-type sensors of an anti-lock brake control system. Papers of the 9th Fluidics Symposium, Hamamatsu, Japan, SICE, 1974, pp. 41–44.
15. Tsuchiya K., Kasagi S., Izawa S. et al. Anti-lock brake control system utilizing fluidic amplifiers. Fluidics Quarterly, 1975, vol. 7, Iss. 1, pp. 88–93.
16. Tsuchiya K., Kasagi S., Izawa S., et al. Anti-lock brake control system utilizing fluidic amplifiers. Papers of the 8th Fluidics Symposium, Okayama, Japan, SICE, 1973, pp. 24–28.
17. Kasimov A. M. *Razvitie pnevmaticheskikh sredstv avtomatizatsii. Trudy konferentsii "Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya"* [Development of pneumatic automation tools. Proceedings of the conference "Hardware and software for control, monitoring and measurement systems"]. Moscow, 2010, pp. 000640–000652. (In Russian)
18. Gradetsky V. G., Chudakov A. D., Chernyshev V. I. *Struynaya pnevmogidravtomatika* [Jet pneumatic-hydro automation]. Moscow: Mir Publ., 1966, 382 p. (In Russian)
19. Lebedev I. V., Treskunov S. L., Yakovenko V. S. *Elementy struinoi avtomatiki* [Elements of jet automation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973, 360 p. (In Russian)
20. Lighthill M. J. Physiological fluid dynamics: a survey. Journal of Fluid Dynamics, 1972, Iss. 52(3), pp. 475–497. DOI: 10.1017/S0022112072001557.
21. Shimizu S. Discrete-vortex simulation of a two-dimensional turbulent jet. Bulletin JSME, 1986, vol. 29(254), pp. 2440–2446. DOI: 10.1299/JSME1958.29.2440.
22. Balabanov A. V. *Instrumental'nye sredstva komp'yuternogo i fizicheskogo modelirovaniya dlya razrabotki integral'nykh struynykh ustroystv. Trudy 15-y mezhduarodnoy konferentsii "Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta"* (CAD/CAM/PDM-2015) [Instrumental means of computer and physical modeling for the development of integral jet devices. Proceedings of the 15th international conference "Systems for design, technological preparation of production and management of stages of the life cycle of an industrial product" (CAD/CAM/PDM-2015)]. Moscow: IPU RAN Publ., 2015, pp. 83–86. (In Russian)
23. Chaplits A. D. *Vizualizatsiya gazovykh potokov vo vnutrennikh kanalakh: metody i rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy* [Visualization of gas flows in internal channels: methods and results of experimental studies]. Nat. akad. nauk Ukrainy, Nat. kosmicheskoe agentstvo Ukrainy, In-t tekhnicheskoy mekhaniki. Dnepropetrovsk: In-t tekhnicheskoy mekhaniki Publ., 2007, 209 p. (In Russian)
24. Chorin A. J. Numerical study of slightly viscous flow. Journal of Fluid Mechanics. 1973, vol. 57(4), pp. 785–796. DOI: 10.1017/S0022112073002016.
25. Aulin V. V. *Analiticheskoe opredelenie kharakteristik silovykh struynykh elementov avtomatizirovannykh vysevayushchikh sistem* [Analytical determination of the characteristics of power jet elements of automated sowing systems]. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2018, vol. 9, Iss. 3, pp. 33–38. DOI: 10.31548/me2018.03.033. (In Russian)
26. Zalmanzon L. A. *Teoriya elementov pnevmoniki* [Theory of pneumatic elements]. Moscow: Nauka Publ., 1969, 508 p. (In Russian)
27. Volkov K. N. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya poperechnoy strui so sverkhzvukovym potokom s ispol'zovaniem razlichnykh modeley turbulentnosti [Numerical modeling of the interaction of a transverse jet with a supersonic flow using various turbulence models]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2015, vol. 56, Iss. 5, pp. 64–75. DOI: 10.15372/PMTF20150505. (In Russian)
28. Burkov Yu. G. Modelirovanie protsessov pereklyucheniya strunnogo elementa [Modeling of the switching processes of the jet element]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of the Volgograd State Technical University]. 2015, vol. 156, Iss. 1, pp. 48–52. (In Russian)
29. Dudnikov D. A. *Chislenny metod modelirovaniya rabocheho protsessa strunnogo bistabil'nogo elementa* [Numerical method for modeling the working process of a jet bistable element]. CADFEM Review, 2014, Iss. 1, pp. 35–39. (In Russian)
30. Il'ina T. E. *Proektirovanie elementa struynoy sistemy upravleniya gazostaticheskim podshpivnikom* [Design of an element of a jet control system for a gas-static bearing]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2015, vol. 15, Iss. 5, pp. 921–929. (In Russian)
31. Artamonov E. I. *Avtomatizirovanoe proektirovanie i izgotovlenie ustroystv avtomatiki na elementakh struynoy tekhniki. Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta* (CAD/CAM/PDM-2013). *Trudy 13-y mezhduarodnoy konferentsii IPU RAN* [Automated design and manufacture of automation devices on jet technology elements. Systems for design, technological preparation of production and management of stages of the life cycle of an industrial product (CAD/CAM/PDM-2013). Proceedings of the 13th international conference of the IPU RAS]. Moscow, 15–17 October 2013, pp. 36–40. (In Russian)
32. Chaplits A. D. *Sovershenstvovanie metoda vizualizatsii gazovykh potokov vo vnutrennikh kanalakh tekhnicheskikh ustroystv* [Improving the method of visualizing gas flows in the internal channels of technical devices]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2012, Iss. 6/7(60), pp. 54–58. (In Russian)
33. Bulat P. V., Volkov K. N., Yakovchuk M. S. *Vizualizatsiya techeniy s sil'nymi i slabymi gazodinamicheskimi razryvami v vychislitel'noy gazovoy dinamike* [Visualization of flows with strong and weak gas-dynamic discontinuities in computational gas dynamics]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 2016, vol. 17, pp. 245–257. (In Russian)
34. Volkov K. N., Emelyanov V. N., Teterina I. V. et al. *Metody i konseptsii vizualizatsii vikhrevykh techeniy v zadachakh vychislitel'noy gazovoy dinamiki* [Methods and concepts of visualization of vortex flows in problems of computational gas dynamics]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 2016, Iss. 17, pp. 81–100. (In Russian)
35. Kuleshova N. A., Vlasov Y. D., Leladze I. S. *Atlas konstruktivnykh elementov skhem pnevmoavtomatiki. Ch. 2. Elementy struynoy sistemy "Volga"* [Atlas of designs of elements of pneumatic automation circuits. Part 2. Elements of the jet system "Volga"]. Moscow: Rotaprint MADI-TU Publ.; 1995. 34 p. (In Russian)
36. *Struynnye logicheskiye elementy i ustroystva programmno upravleniya stankami i promyshlennymi robotami. Katalog* [Inkjet logic elements and software control devices for machine tools and industrial robots. Catalog]. Moscow: NII Mash Publ., 1979, 71 p. (In Russian)
37. Rogovoy A. S. *Primeneniye vikhrekamernykh nagnetateley v gidro- i pnevmotransportnykh sistemakh* [Application of vortex chamber blowers in hydraulic and pneumatic transport systems]. *Visnyk NTUU "KPI". Mashinobuduvannya: zbirnyk naukovykh prats'* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Mechanical Engineering]. 2016, Iss. 3(78), pp. 65–70. (In Ukrainian)
38. Levashov A. N. *Sovershenstvovanie rabochikh kharakteristik vikhrekamernykh nagnetateley dlya pnevmotransportnykh sistem melkodispersnykh sypuchikh gruzov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the performance of vortex chamber compressors for pneumatic transport systems of finely dispersed bulk materials: author's abstract of the thesis for the degree of candidate of technical sciences]. Lugansk, 2022, 22 p. (In Russian)
39. Levashov Y. N. *Povysheniye effektivnosti truboprovodnykh transportnykh sistem snizheniem energozatrat na upravleniye vikhrevoi armaturoy: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Increasing the efficiency of pipeline transport systems by reducing energy costs for controlling vortex fittings: author's abstract of the thesis for the degree of candidate of technical sciences]. Lugansk, 2022, 22 p. (In Russian)