

На правах рукописи



**Филатов Дмитрий Алексеевич**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА И УЛЬТРАЗВУКА**

Специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО ИргУПС).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ **Мухопад Юрий Федорович**

**Официальные оппоненты:** **Асламова Вера Сергеевна**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, кафедра «Техносферная безопасность», профессор

**Пудалов Алексей Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Ангарская государственная техническая академия», г. Ангарск, кафедра «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника», доцент

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», г. Братск

Защита диссертации состоится 26 ноября 2015 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.004.01 на базе ФГБОУ ВПО "Иркутский государственный университет путей сообщения" по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. А-803. Тел. 8-(3952)-63-83-11, факс: (8-3952) 38-76-72; e-mail: [mail@irgups.ru](mailto:mail@irgups.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО "Иркутский государственный университет путей сообщения", <http://www.irgups.ru>.

Автореферат разослан "12" октября 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Данеев Алексей Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Одной из важнейших задач при создании сложных технических систем является обеспечение защиты окружающей среды на предприятиях, имеющих большую степень загрязнения. Важным технологическим процессом для защиты окружающей среды в промышленности является очистка воздуха от пыли с использованием высокопроизводительных прямооточных циклонов. В другой области, в частности в нефтяной промышленности, используют акустические газоструйные излучатели (акустические форсунки, ультразвуковые свистки и сирены), что исключает возможность возгорания. Кроме того, для опреснения морской воды, отопления производственных и жилых помещений, для очистки железнодорожных стрелок от снега и льда и в других технологических процессах могут быть использованы вихревые трубы. Вихревые трубы не требуют дополнительных источников энергии кроме подачи сжатого воздуха или воды под давлением.

Трудность автоматизации процессов управления и контроля сложных технических систем, состоящих из вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов, заключается в том, что на данный момент до конца не изучены процессы, протекающие в подобных системах.

Существенный вклад в моделирование, проектирование и совершенствование сложных технических систем, таких как система очистки технологических сред с применением вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов, внесли отечественные ученые: Б.А. Агранат, Г.Н. Абрамович, В.П. Алексеев, В.С. Асламова, Ю.Я. Борисов, В.Ц. Ванчинков, В.Н. Гинин, А.Ф. Гуцол, В.С. Мартыновский, В.С. Марюхненко, А.П. Меркулов, Л.Д. Розеберг, а так же зарубежные ученые: П. Брэдшоу, J. Hartmann, В. Trolle, R. Hilch и др.

Создание таких сложных технических систем рассматривается как задача механики без учета управляющих подсистем. Анализ динамических процессов в сложных технических системах, только с позиции теории механизмов и машин, является недостаточным, так как не учитывает информационно-управляющего воздействия, приводящего к желаемому эффекту.

Кроме того, до сих пор отсутствуют работы по исследованию совместного действия ультразвуковых излучений и вихревых эффектов в воздушных и водных средах. Тем более отсутствуют работы по исследованию систем управления такими эффектами. Поэтому диссертационные исследования в этой области являются актуальными и востребованными как с научной, так и с практической точки зрения.

**Целью представленных** в диссертации научных исследований является исследование комплексной системы вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов и создание математической модели системы очистки технологических сред для синтеза автоматизированной системы очистки технологических сред с применением вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Разработать систему вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов очистки технологических сред.
- Создать математическую и физическую модель комплексной системы исполнительных механизмов очистки технологических сред.
- Выявить закономерности, определить управляющие параметры исполнительных механизмов системы очистки.

- Разработать алгоритмы и аппаратную модель автоматизированной системы очистки технологических сред.

- Произвести экспериментальные исследования вихревых и ультразвуковых параметров, подтверждающих достоверность результатов математического моделирования системы очистки технологических сред, работоспособность конструкции и достоверность исследований.

**Объект исследования.** Физические процессы в системе очистки с комплексным взаимодействием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов, и методы информационно-управляющего воздействия в автоматизированной системе очистки технологических сред.

**Предмет исследований.** Методы управления и контроля системы очистки технологических сред с комплексным взаимодействием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

**Методы исследований.** Системный анализ, физическое и математическое моделирование, экспериментальная оценка параметров, моделирование с использованием сетей Петри, методы представления динамических процессов управления автоматными моделями.

**Научная новизна** состоит в том, что в диссертации впервые получены следующие положения, которые выносятся на защиту:

- Новая система очистки технологических сред с комплексным взаимодействием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

- Методика сопоставления математических моделей динамических процессов и универсальных сетей Петри.

- Структурная организация автоматизированных систем очистки технологических сред с автоматным управлением.

- Алгоритм работы автоматизированной системы очистки технологических сред, обеспечивающий управление и контроль технологическими процессами очистки в режиме реального времени.

- Модификация методики синтеза управляющего автомата с внутренним мультиплексором и стековой памятью, позволяющая снизить объем памяти комбинационной схемы переходов в автомате, приблизительно в 2 раза.

**Достоверность и обоснованность** научных результатов, представленных в диссертации, подтверждается совпадением расчетных данных предложенных математических моделей с экспериментальными данными системы исполнительных механизмов для очистки технологических сред в пределах от 92,5 до 98,5%.

**Практическая значимость.** На основе полученных в диссертационной работе результатов возможно решение следующих практических задач:

- Впервые показаны возможности создания вихревых и ультразвуковых механизмов для очистки воздушно-полевых и водных сред (заявка на патент на полезную модель РФ №2015112888) для широких областей в промышленности для очистки воздуха от пыли, очистки загрязнений и обеззараживания различных поверхностей, и на транспорте для очистки автодорожных и железнодорожных путей от снега и льда.

- Разработано программное обеспечение автоматизированной системы очистки технологических сред с комплексным взаимодействием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615404), обеспечивающее управление и контроль технологическими процессами очистки в режиме реального времени.

- Модифицированная методика синтеза управляющего автомата использована для создания подсистемы управления и контроля автоматизированной системы очистки технологических сред с комплексным взаимодействием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

- Результаты исследований подтверждают достоверность предложенных методик, что дает возможность проектировать с требуемыми параметрами и автоматизировать процессы в вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмах для различных типов технологических процессов.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований:

1) внедрены в учебный процесс Иркутского государственного университета путей сообщения, при чтении дисциплин "Интеллектуальные системы управления" и реализованы в виде лабораторных работ по данным дисциплинам;

2) использованы в бюджетной НИР, № госрегистрации 01201251780;

3) практические методы проектирования переданы в ООО "ХИМТЕХ-ЮКОС" для реализации температурного разделения попутных нефтяных газов при добыче нефти.

**Апробация работы.** Научные результаты, полученные в процессе диссертационных исследований, обсуждались на следующих научных конференциях: научно-технической конференции с международным участием «Проблемы транспорта Восточной Сибири», г. Иркутск, 2011 г.; научно-технической конференции с международным участием «Проблемы транспорта Восточной Сибири», г. Иркутск, 2012 г.; научно-технической конференции с международным участием «Проблемы транспорта Восточной Сибири», г. Иркутск, 2013 г.; XVIII Байкальской Всероссийской конференции "Информационные и математические технологии в науке и управлении" г. Иркутск, 2013 г.; VIII Международной научно-практической конференции «Перспективные разработки науки и техники – 2013», г. Перемышль, 2013 г.; II Международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в науке и технике», г. Омск, 2015 г., научно-технических семинарах кафедры УТС и АПП ИрГУПС 2011-2014 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе пять статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования диссертационных исследований, в отчете о научно-исследовательской работе, заявка на патент на полезную модель РФ и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В работах с соавторами соискателю принадлежит от 25 до 50% результатов. Положения, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает введение, четыре главы основного текста, заключение, библиографический список из 124 наименований, приложения. Общий объем диссертации 146 страниц, в тексте содержится 36 рисунков и 12 таблиц. В приложении приведены результаты математического моделирования и материалы о внедрении результатов работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы и приведена общая характеристика диссертации с изложением основных положений и результатов работы, обозначены цель и задачи исследования.

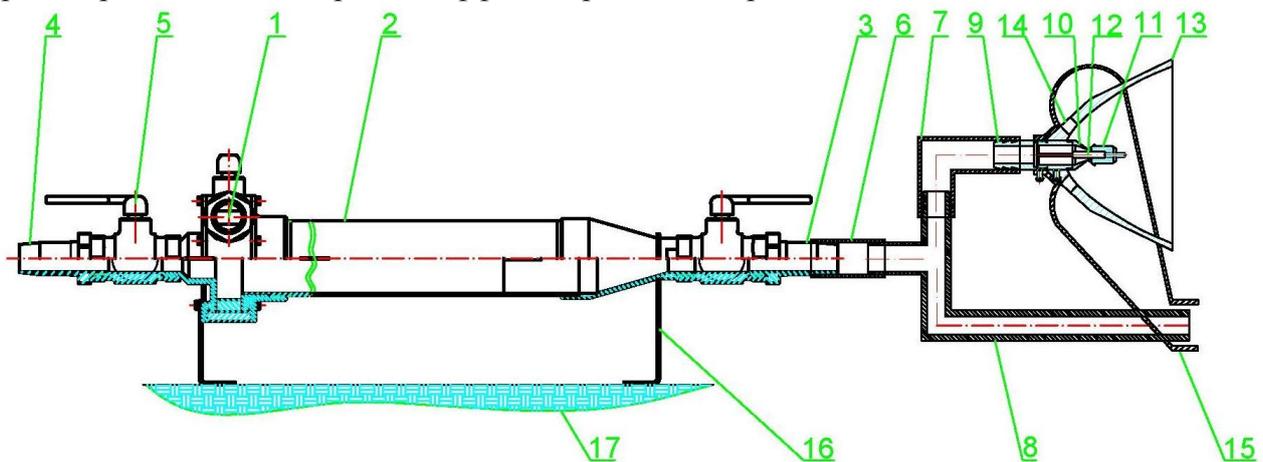
**В первой главе** приведен обзор существующих систем очистки технологических сред, существующих вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов, методик разработки математических моделей динамических процессов данных исполнительных

механизмов. Определены назначение, структура, состав и задачи разработки автоматизированной системы очистки технологических сред с использованием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

Применение систем, состоящих из комбинации вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов для очистки технологических сред, способствует высокой эффективности, надежности и экономичности в использовании, за счет отсутствия необходимости в дополнительных источниках энергии, кроме энергии сжатого воздуха. Очистка технологических сред от загрязнений за счет применения ультразвука для дробления загрязнений и обеззараживания очищаемых поверхностей и за счет применения вихревого эффекта для обдувки очищаемых поверхностей горячим сжатым воздухом, исключает все промежуточные ступени очистки.

Во второй главе приведено математическое моделирование динамических процессов, протекающих в системе очистки технологических сред с использованием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

Общий вид экспериментальной ультразвуковой системы очистки технологических сред с применением вихревого эффекта приведен на рис. 1.



**Рис. 1. Общий вид ультразвуковой системы очистки технологических сред с применением вихревого эффекта, где 1 – сопло вихревой трубы, 2 – гладкая цилиндрическая труба, 3, 4, 9 – штуцер, 5 – дроссель, 6, 7 – стыковочный элемент, 8 – пневмообдувка, 10 – сопло ультразвуковой сирены, 11 – резонатор, 12 – стержень, 13 – рефлектор, 14 – отверстия для выхода отработанного сжатого воздуха, 15 – отборная камера отработанного сжатого воздуха, 16 – элемент крепления системы, 17 – элемент рабочей поверхности**

Система работает следующим образом:

Сжатый воздух поступает в вихревую трубу с пневмомагистральной и регулируется дросселем. В вихревой трубе сжатый воздух делится на два потока (горячий и холодный), выходит через горячий и холодный выход вихревой трубы и регулируется дросселем на холодном выходе. Часть горячего сжатого воздуха поступает в ультразвуковую сирену, а другая часть – в пневмообдувку. Горячий сжатый воздух регулируется дросселем на входе в ультразвуковую сирену и дросселем на входе в пневмообдувку. После прохождения через ультразвуковую сирену отработанный сжатый воздух на 99% возвращается в пневмообдувку, а сгенерированные им ультразвуковые волны в сирене, наряду со сжатым горячим воздухом пневмообдувки поступают на обрабатываемую поверхность. Датчики температуры и давления установлены на каждом дросселе системы очистки.

Приведена математическая модель динамических процессов, протекающих в системе ультразвуковой очистки технологических сред с применением вихревого эффекта, состоящая из комбинации классических уравнений модели вихревой трубы (ВТ), разработанной Меркуловым А.П., и модели ультразвуковой сирены, разработанной Борисовым Ю.Я.:

1. Уравнения движения:

$$v_{r_{вт}} \frac{\partial v_{r_{вт}}}{\partial r_{вт}} - \frac{v_{\tau}^2}{r_{вт}} = -\frac{1}{\rho_{вт}} \frac{\partial p}{\partial r_{вт}}, \quad (1)$$

$$v_{r_{вт}} \frac{\partial v_{r_{вт}}}{\partial r_{вт}} + v_{r_{вт}} \frac{v_{\tau}}{r_{вт}} = 0. \quad (2)$$

где  $v_{r_{вт}}$  – радиальная скорость сжатого воздуха в ВТ,  $v_{\tau}$  – тангенциальная скорость сжатого воздуха в ВТ,  $p$  – давление сжатого воздуха в ВТ,  $r_{вт}$  – радиус ВТ,  $\rho_{вт}$  – плотность сжатого воздуха в ВТ.

2. Уравнение сплошности:

$$\frac{\partial(\rho_{вт} \cdot r_{вт} \cdot v_r)}{\partial r_{вт}} = 0. \quad (3)$$

3. Уравнение энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial r_{вт}} = \frac{1}{\rho_{вт} \cdot c_p} \frac{\partial p}{\partial r_{вт}}, \quad (4)$$

где  $T$  – температура сжатого воздуха в ВТ,  $c_p$  – изобарная теплоемкость сжатого воздуха.

4. Уравнение состояния:

$$p = g \cdot \rho_{вт} \cdot R \cdot T, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $R$  – газовая постоянная.

5. Уравнение пульсации температуры:

$$\partial T' = l_{пс} \left[ \frac{\partial T}{\partial r_{вт}} - \left( \frac{\partial T}{\partial r_{вт}} \right)_s \right], \quad (6)$$

где  $l_{пс}$  – длина пути смещения.

6. Уравнение пульсации скорости при изотропной турбулентности:

$$v' = \frac{\partial v_{\tau}}{\partial r_{вт}} \cdot l_{пс}. \quad (7)$$

7. Уравнение местной скорости звука:

$$c = \sqrt{\left( \frac{\partial p}{\partial \rho_c} \right)_s}, \quad (8)$$

где  $s$  – индекс, указывающий на изоэнтропичность процесса.

8. Уравнение длины волны пространственной осцилляции струи:

$$\Delta = A \cdot d_c \cdot \sqrt{p - A_{ср}}, \quad (9)$$

где  $A$  – коэффициент, изменяющийся для разных типов сопел ультразвукового излучателя в пределах от 0,77 до 1,22,  $d_c$  – диаметр сопла,  $A_{ср}$  – среднее значение, принятое Эмдемом.

9. Уравнение частоты генерации излучателя:

$$f = \frac{c}{4 \cdot [h_p + 0,4 \cdot l_{ст} + (d_p - d_{ст}) \cdot (0,4 - 0,2 \cdot h_p / d_c)]}, \quad (10)$$

где  $h_p$  – глубина резонатора,  $l_{ст}$  – длина стержня,  $d_p$  – диаметр резонатора,  $d_{ст}$  – диаметр стержня.

10. Уравнение интенсивности звука:

$$I = \frac{P^2}{\rho_c \cdot c} = \frac{v_0^2 \cdot \rho_c \cdot c}{2} = 2 \cdot \pi \cdot A_0 \cdot f^2 \cdot \rho_c \cdot c = P \cdot c, \quad (11)$$

где  $v_0$  – амплитуда колебательной скорости,  $A_0$  – амплитуда смещения,  $P$  – радиационное давление.

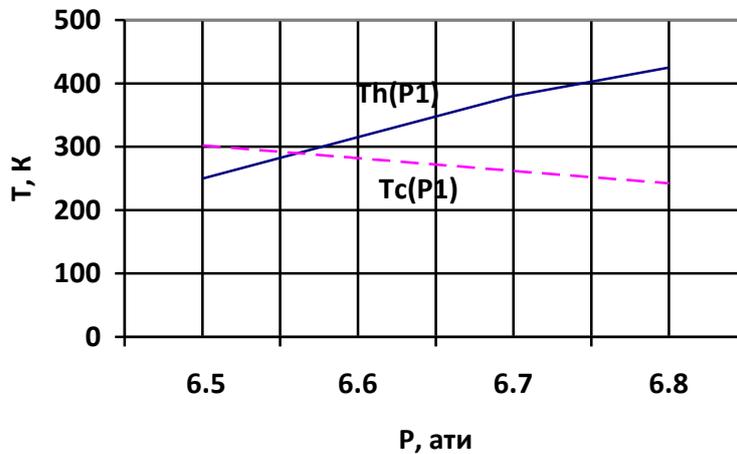
11. Уравнение акустической мощности:

$$W_a = \frac{P_0^2}{\rho_c \cdot c} 2 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot \int_0^\pi \left( \frac{P_\alpha}{P_0} \right)^2 \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha. \quad (12)$$

где  $r_c$  – радиус сопла,  $p_\alpha$  – эффективное значение звукового давления,  $\alpha$  – угол сдвига фаз.

Согласно математической модели разработаны основные зависимости параметров вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов (рис. 2-4).

На рис. 2-4 основным управляющим параметром системы очистки технологических сред является давление  $P_1$  сжатого воздуха на входе в вихревую трубу, а второстепенным управляющим параметром является давление  $P_h$  сжатого воздуха на горячем выходе из вихревой трубы.



**Рис. 2. Зависимость температуры горячего и холодного потоков сжатого воздуха на выходах из вихревой трубы от входного давления сжатого воздуха**

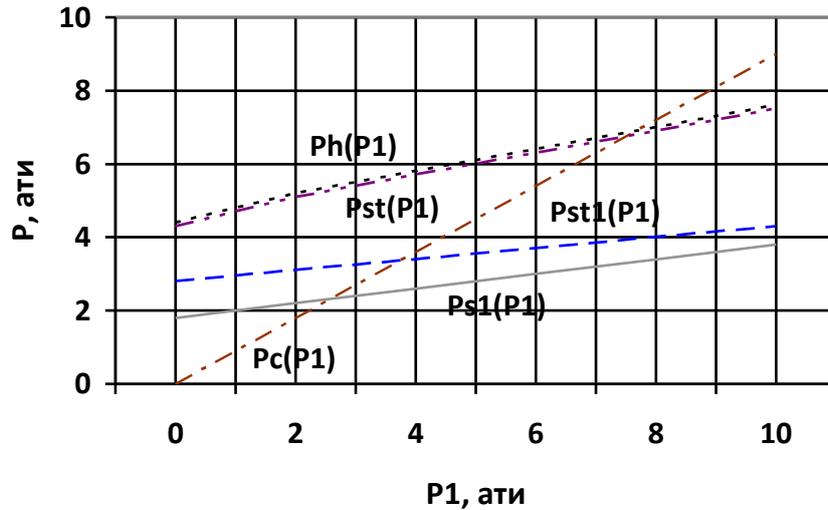


Рис. 3. Зависимость давления  $P_1$  сжатого воздуха на входе и давлений сжатого воздуха  $P_c$ ,  $P_h$ ,  $P_{s1}$ ,  $P_{st1}$ ,  $P_{st}$  – соответственно на горячем и холодном выходах из вихревой трубы, на входе в ультразвуковую сирену, на входе и выходе из пневмообдудки, [ати]

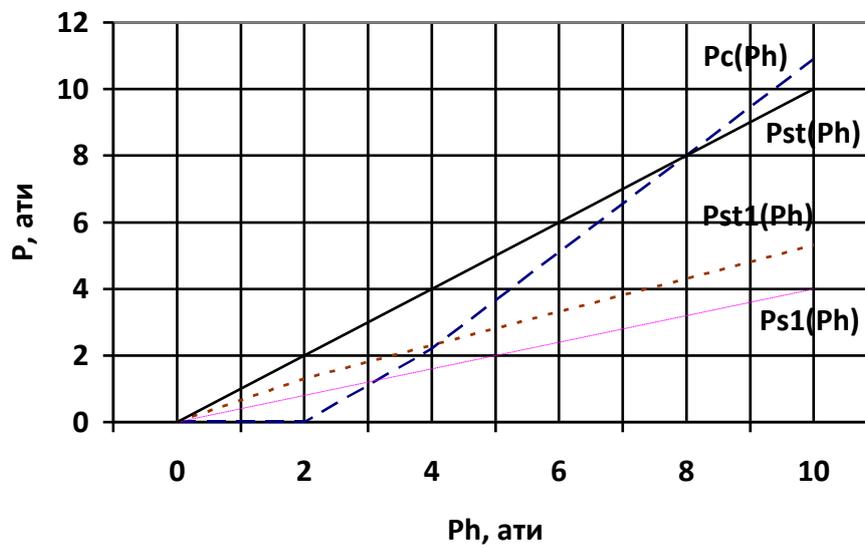
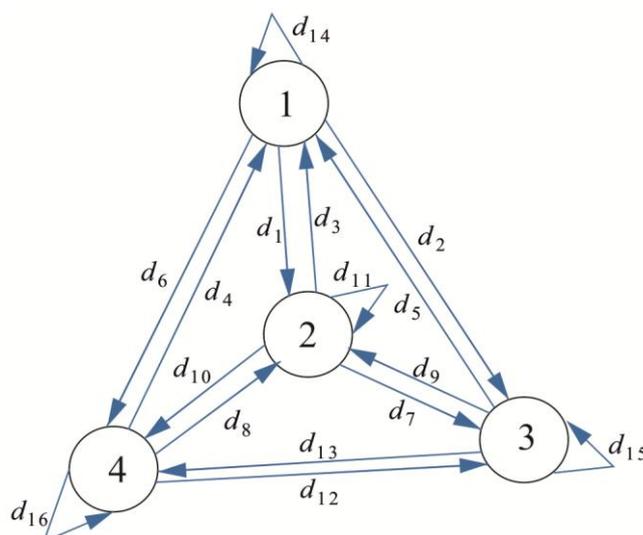


Рис. 4. Зависимость давления  $P_h$  сжатого воздуха на горячем выходе и давлений сжатого воздуха  $P_c$ ,  $P_{s1}$ ,  $P_{st1}$ ,  $P_{st}$  – соответственно на холодном выходе из вихревой трубы, на входе в ультразвуковую сирену, на входе и выходе из пневмообдудки, [ати]

Согласно математической модели динамических процессов и зависимостям (рис. 2-4) разработан направленный граф сетевой модели подсистемы управления и контроля системы очистки технологических сред с применением вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов (рис. 5).

В графе состояния устройства обозначены: 1 – обслуживание модуля 1 – управление и контроль давлением  $P_1$  сжатого воздуха на входе в вихревую трубу; 2 – обслуживание модуля 2 – управление и контроль давлением  $P_c$  сжатого воздуха на холодном выходе вихревой трубы; 3 – обслуживание модуля 3 – управление и контроль давлением  $P_{s1}$  сжатого воздуха на горячем выходе из вихревой трубы и на входе в ультразвуковую сирену; 4 – обслуживание модуля 4 – управление и контроль давлением  $P_{st1}$  сжатого воздуха на горячем выходе из вихревой трубы и входе в пневмообдувку, дугами  $d_1-d_{10}$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{13}$  обозначены переходы между указанными состояниями. Дуги  $d_{11}$ ,  $d_{14}$ ,  $d_{15}$ ,  $d_{16}$  обозначают завершение работы соответственно модуля 2 (при избыточном давлении  $P_c$  или его отсутствии на холодном выходе вихревой трубы), модуля 1 (при избыточном давлении  $P_1$  или его отсутствии на входе в вихревую трубу), модуля 3 (при избыточном давлении  $P_{s1}$  или его отсутствии на горячем выходе вихревой трубы или на входе в ультразвуковую сирену) и модуля 4 (при избыточном давлении  $P_{st1}$  на горячем выходе вихревой трубы или на входе в пневмообдувку).



**Рис. 5. Сетевая математическая модель процессов, протекающих в подсистеме управления и контроля системы вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов**

После завершения работы одного из четырех модулей следует завершение работы системы управления и контроля и отключение системы очистки. Управление и контроль модулями осуществляется по информации от датчиков. Датчики расположены в каждом из модулей. С помощью дросселей подсистема меняет параметры давления до рабочего состояния устройства очистки при малейшем изменении любого из приведенных выше параметров давления.

Разработаны списки условий (табл. 1) и событий (табл. 2) согласно математической модели (рис. 5) подсистемы управления и контроля системы очистки технологических сред с применением вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов. Разработан общий список предусловий и постусловий (табл. 3), сеть Петри с запрещающими дугами (рис. 6), состоящей из основного маршрута обхождения всех ребер сети Петри (рис. 7) и обратного маршрута обхождения всех ребер сети Петри (рис. 8).

Таблица 1. Список условий

Обозначение	Условия	Наличие начальных условий
$b_1$	Обслуживание модуля 1 (принят запрос с датчика $D_1$ )	Есть
$b_2$	Вывод данных входных и выходных параметров модуля 1	Нет
$b_3$	Обслуживание модуля 2 (принят запрос с датчика $D_2$ )	Есть
$b_4$	Вывод данных выходных параметров модуля 2	Нет
$b_5$	Обслуживание модуля 3 (принят запрос с датчика $D_3$ )	Есть
$b_6$	Вывод данных выходных параметров модуля 3	Нет
$b_7$	Обслуживание модуля 4 (принят запрос с датчика $D_4$ )	Есть
$b_8$	Вывод данных выходных параметров модуля 4	Нет

Таблица 2. Список событий

Обозначение	Событие
$d_1$	Переход от модуля 1 к модулю 2 (Сравнение $p_1$ и $P_1$ , $t_1$ и $T_1$ )
$d_2$	Переход от модуля 1 к модулю 3 (Сравнение $p_1$ и $P_1$ , $t_1$ и $T_1$ )
$d_3$	Возврат из модуля 2 к модулю 1 (Сравнение $p_c$ и $P_c$ , $t_c$ и $T_c$ )
$d_4$	Возврат из модуля 4 к модулю 1 (Сравнение $p_{st1}$ и $P_{st1}$ , $t_{st1}$ и $T_{st1}$ )
$d_5$	Возврат из модуля 3 к модулю 1 (Сравнение $t_{s1}$ и $P_{s1}$ , $t_{s1}$ и $T_{s1}$ )
$d_6$	Переход от модуля 1 к модулю 4 (Сравнение $p_1$ и $P_1$ , $t_1$ и $T_1$ )
$d_7$	Переход от модуля 2 к модулю 3 (Сравнение $p_c$ и $P_c$ , $t_c$ и $T_c$ )
$d_8$	Возврат из модуля 4 к модулю 2 (Сравнение $p_{st1}$ и $P_{st1}$ , $t_{st1}$ и $T_{st1}$ )
$d_9$	Возврат из модуля 3 к модулю 2 (Сравнение $t_{s1}$ и $P_{s1}$ , $t_{s1}$ и $T_{s1}$ )
$d_{10}$	Переход от модуля 2 к модулю 4 (Сравнение $p_c$ и $P_c$ , $t_c$ и $T_c$ )
$d_{11}$	Переход к завершению работы микропроцессорной системы на стадии прохождения сжатого воздуха через вихревую трубу.
$d_{12}$	Возврат из модуля 4 к модулю 3 (Сравнение $p_{st1}$ и $P_{st1}$ , $t_{st1}$ и $T_{st1}$ )
$d_{13}$	Переход от модуля 3 к модулю 4 (Сравнение $t_{s1}$ и $P_{s1}$ , $t_{s1}$ и $T_{s1}$ )
$d_{14}$	Переход к завершению работы микропроцессорной системы на стадии подачи сжатого воздуха в вихревую трубу.
$d_{15}$	Переход к завершению работы микропроцессорной системы на стадии подачи сжатого воздуха в ультразвуковую сирену.
$d_{16}$	Переход к завершению работы модуля 4.

Таблица 3. Список условий и событий

Предусловие	Событие	Постусловие
$b_1b_2$	$d_1$	$b_2b_3b_4$
$b_1b_2$	$d_2$	$b_2b_3b_6$
$b_3b_4$	$d_3$	$b_1b_2b_4$
$b_7b_8$	$d_4$	$b_1b_2b_8$
$b_5b_6$	$d_5$	$b_1b_2b_6$
$b_1b_2$	$d_6$	$b_2b_7b_8$
$b_3b_4$	$d_7$	$b_4b_5b_6$
$b_7b_8$	$d_8$	$b_3b_4b_8$
$b_5b_6$	$d_9$	$b_3b_4b_6$
$b_3b_4$	$d_{10}$	$b_4b_7b_8$
$b_3b_4$	$d_{11}$	$b_3b_4$
$b_7b_8$	$d_{12}$	$b_5b_6b_8$
$b_5b_6$	$d_{13}$	$b_6b_7b_8$
$b_1b_2$	$d_{14}$	$b_1b_2$
$b_5b_6$	$d_{15}$	$b_5b_6$
$b_7b_8$	$d_{16}$	$b_7b_8$

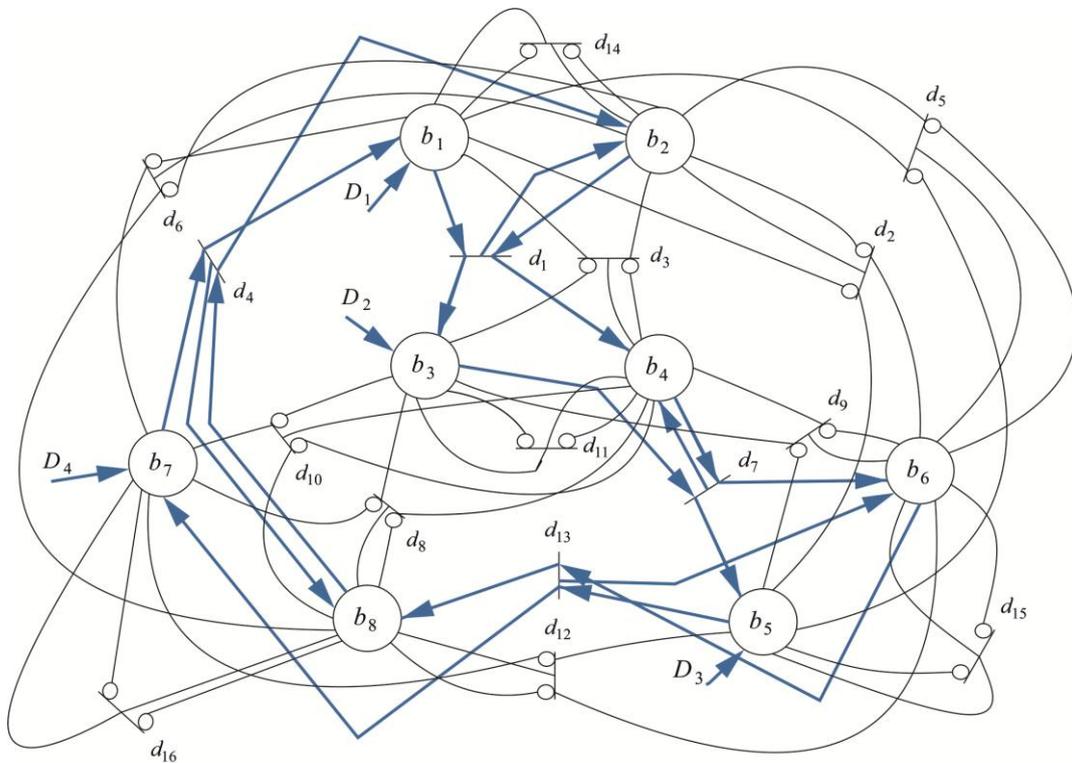
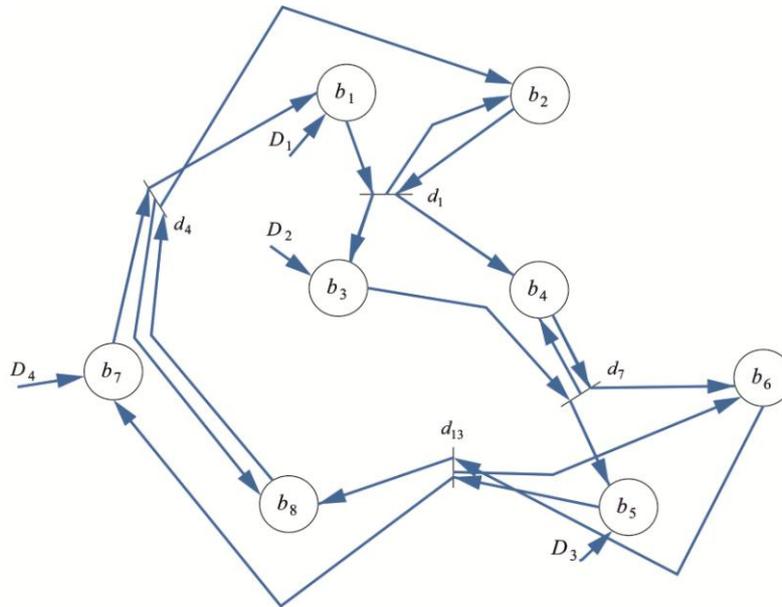
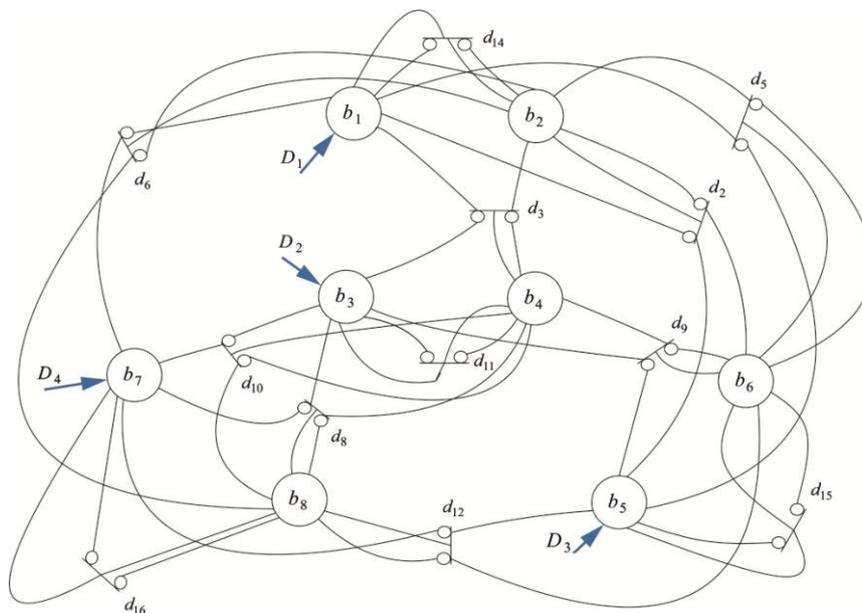


Рис. 6. Сеть Петри подсистемы управления и контроля системы очистки технологических сред с применением вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов



**Рис. 7. Основной маршрут обхождения всех ребер сети Петри**



**Рис. 8. Обратный маршрут обхождения всех ребер сети Петри**

Приведено исследование по графу достижимости сети Петри для исключения ошибок логического проектирования для дальнейшего определения стратегии тестирования системного уровня управляющей подсистемы системой очистки технологических сред с применением вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

**В третьей главе** приведена разработка автоматизированной системы очистки технологических сред с использованием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов. Выявлены особенности управления и контроля автоматизированной системы очистки технологических сред с использованием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов. Разработан алгоритм работы автоматизированной системы очистки технологических сред с использованием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов (рис. 9).

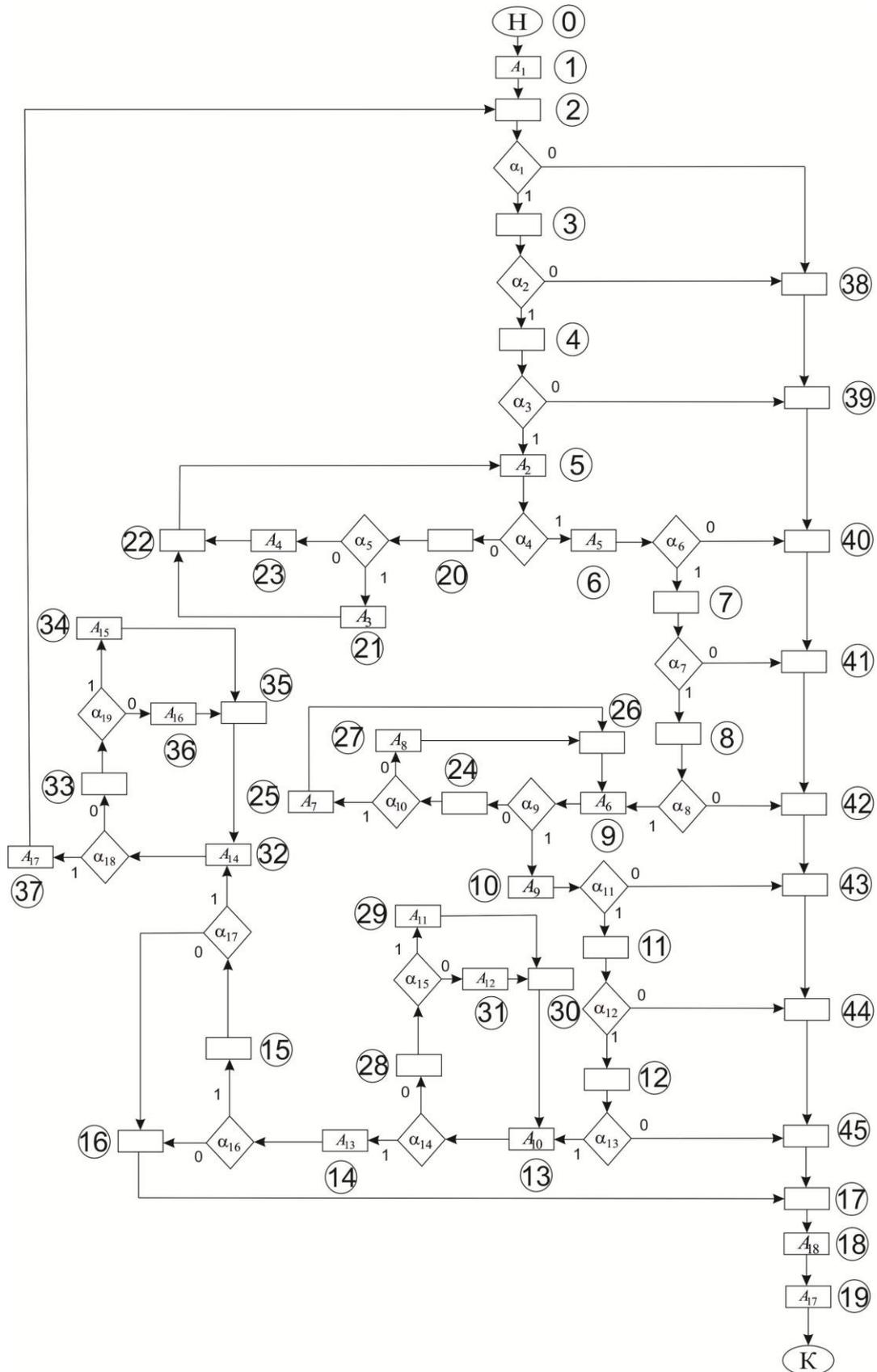
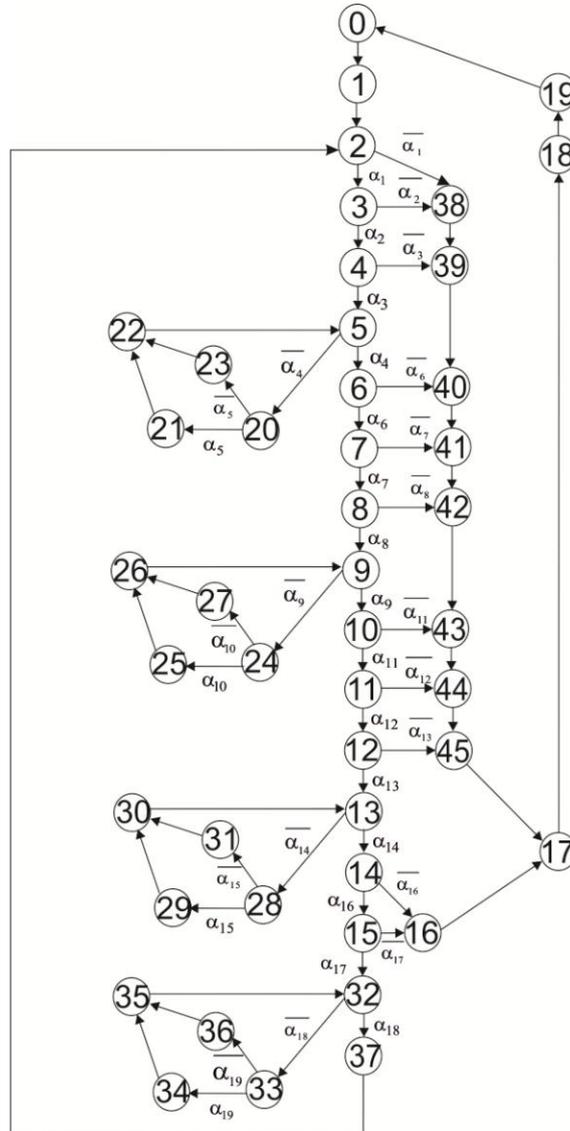


Рис. 9. Алгоритм работы автоматизированной системы очистки технологических сред с включенными пустыми операторами, где  $\alpha_0 - \alpha_{18}$  – логические условия,  $A_0 - A_{18}$  – микрокоманды

Такая модификация граф-схемы алгоритма позволяет использовать наиболее экономичную схему микропрограммного автомата, в которой сложность основной комбинационной схемы переходов из состояния  $\alpha(t)$  в  $\alpha(t+1)$  уменьшается в  $2^{q-1}$  раз.

Приведена программная реализация управляющего автомата методом структурного автоматного программирования А.Ю. Мухопода. Для этого алгоритм работы (рис. 9) переведен в граф переходов (рис. 10).



**Рис. 10. Граф переходов**

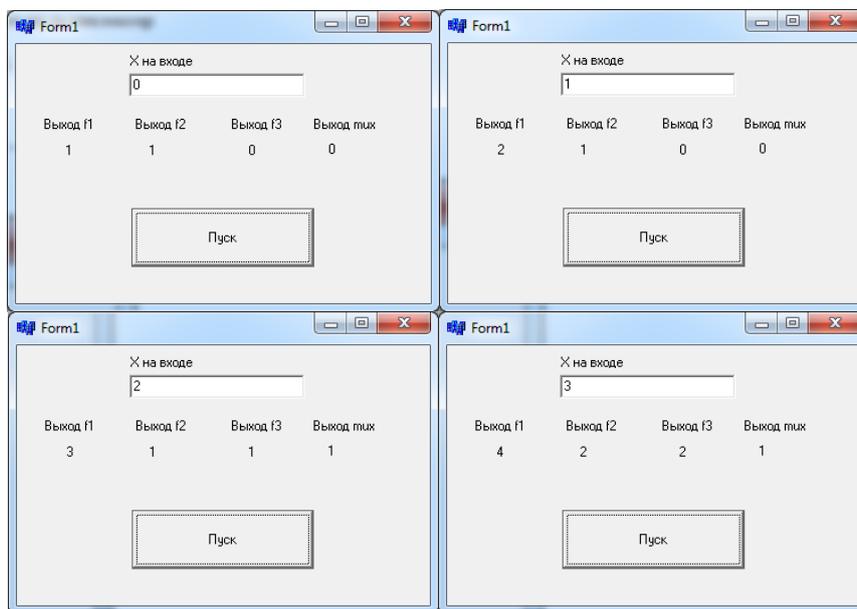
По методике синтеза программного кода выполнена следующая последовательность действий:

1) составлена таблица адресации, которая выполняет функции определения адреса для выбора нужного  $a_i \leftarrow \{a\}$  по коду  $a(t+1)$ , определения  $a_i(t+1) \rightarrow \alpha a(t)$ ,  $a_i(t+1) \rightarrow \beta a(t)$  и  $a_i(t+1) \rightarrow \gamma a(t)$ ;

2) составлена таблица соответствия кодов  $a_i \leftarrow \{a\}$  микрокомандам  $A_i \leftarrow \{A\}$ , отвечающая за формирование выходного действия;

- 3) включение соответствующей исполнительной команды  $A_i \leftarrow \{A\}$  определяется по таблице соответствия кодов  $a_i \leftarrow \{a\}$  микрокомандам  $A_i \leftarrow \{A\}$
- 4) Проверяется условие на завершение команды  $A_i \leftarrow \{A\}$ ;
- 5) Считываются значения  $\alpha_j \leftarrow \{\alpha\}$  по результату исполнительной команды  $A_i \leftarrow \{A\}$ ;
- б) Передача обновленного логического слова  $\alpha_1\alpha_2\dots\alpha_q$  осуществляется на информационный вход мультиплексора.

Программный код реализован на языке C++ в среде программирования Borland C++. Программа была проверена по таблице тестов с выводом результатов в зависимости от входного воздействия (рис. 11).



**Рис. 11. Тестирование программы управляющего автомата**

Использование автомата с мультиплексором по методике А.Ю. Мухопида позволяет уменьшить объем требуемой памяти в  $2^{18}$  раза по сравнению с использованием управляющего автомата Мура. В диссертационной работе предложен метод дополнительного уменьшения объема памяти комбинационной схемы автомата, приблизительно в 2 раза, за счет включения в его структуру стековой памяти первого рода, состоящей из пяти регистров, и объединения четырех подграфов с одной структурой в один подграф.

В предложенной структурной организации автомата для рассматриваемого применения из 38 переходов 50% переходов реализуются суммирующим счетчиком, и только 19 переходов реализуются комбинационной схемой. В режиме работы со счетчиком одновременно повышается быстродействие работы автомата. Для этого алгоритм работы (рис. 10) переведен в граф переходов алгоритма с применением стековой памяти (рис. 12) за счет ввода дополнительных вершин 5, 10, 15, 19, 26 и отнесения однотипных подграфов (5, 20-23; 9, 24-27; 13, 28-31; 32, 33-36 рис. 10) в конец графа переходов в виде типовой структуры (21-25 рис. 12). Обращения к этой структуре из вершин 5, 9, 13, 32 (рис. 12) потребует замены микрокоманд  $A_i \leftarrow \{A\}$ , соответствующих объединенным подграфам 20-23, 24-27, 28-31, 33-36 (рис. 10).

Реализацию замены  $\alpha_j$  и кода возврата  $x_1, x_2, \dots, x_m - 5, 10, 15, 19, 26$  целесообразно осуществить через кольцевую стековую память (рис. 13).

Графу переходов соответствует схема управляющего автомата со стековой памятью (рис. 14).

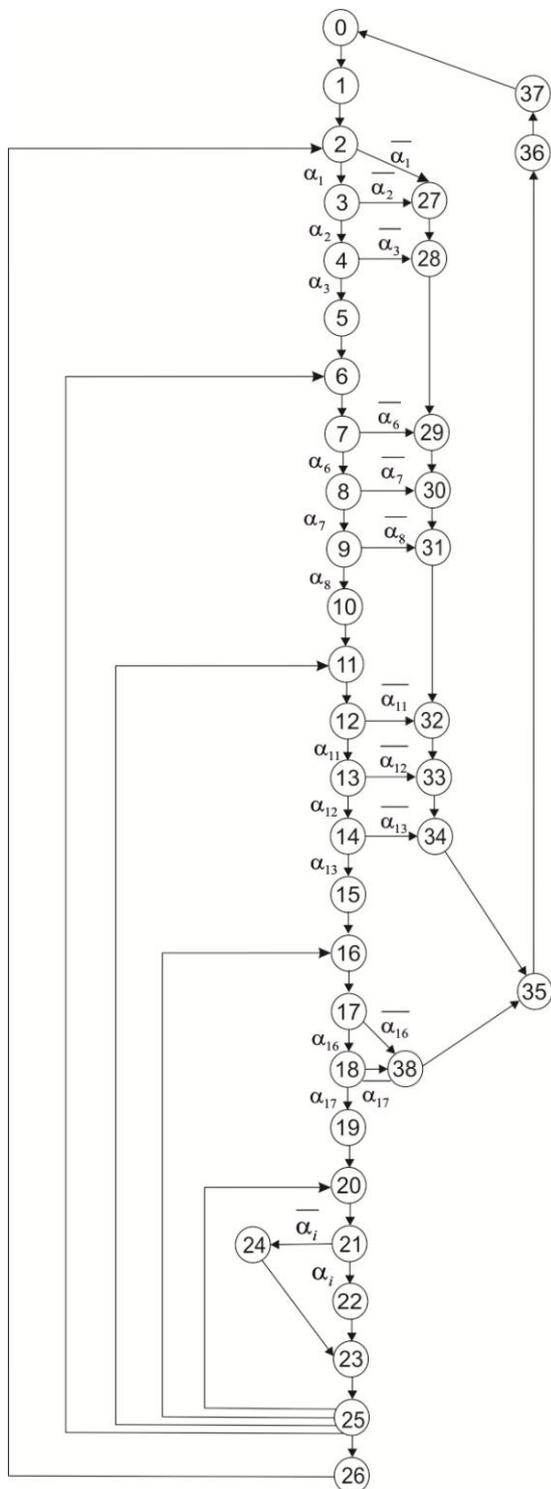


Рис. 12. граф переходов алгоритма с применением стековой памяти

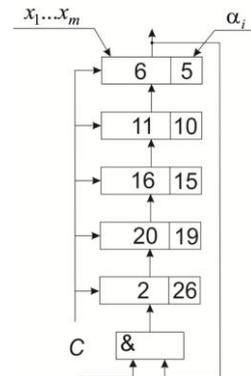


Рис. 13. Стековая память смены  $\alpha_j \leftarrow \{\alpha\}$

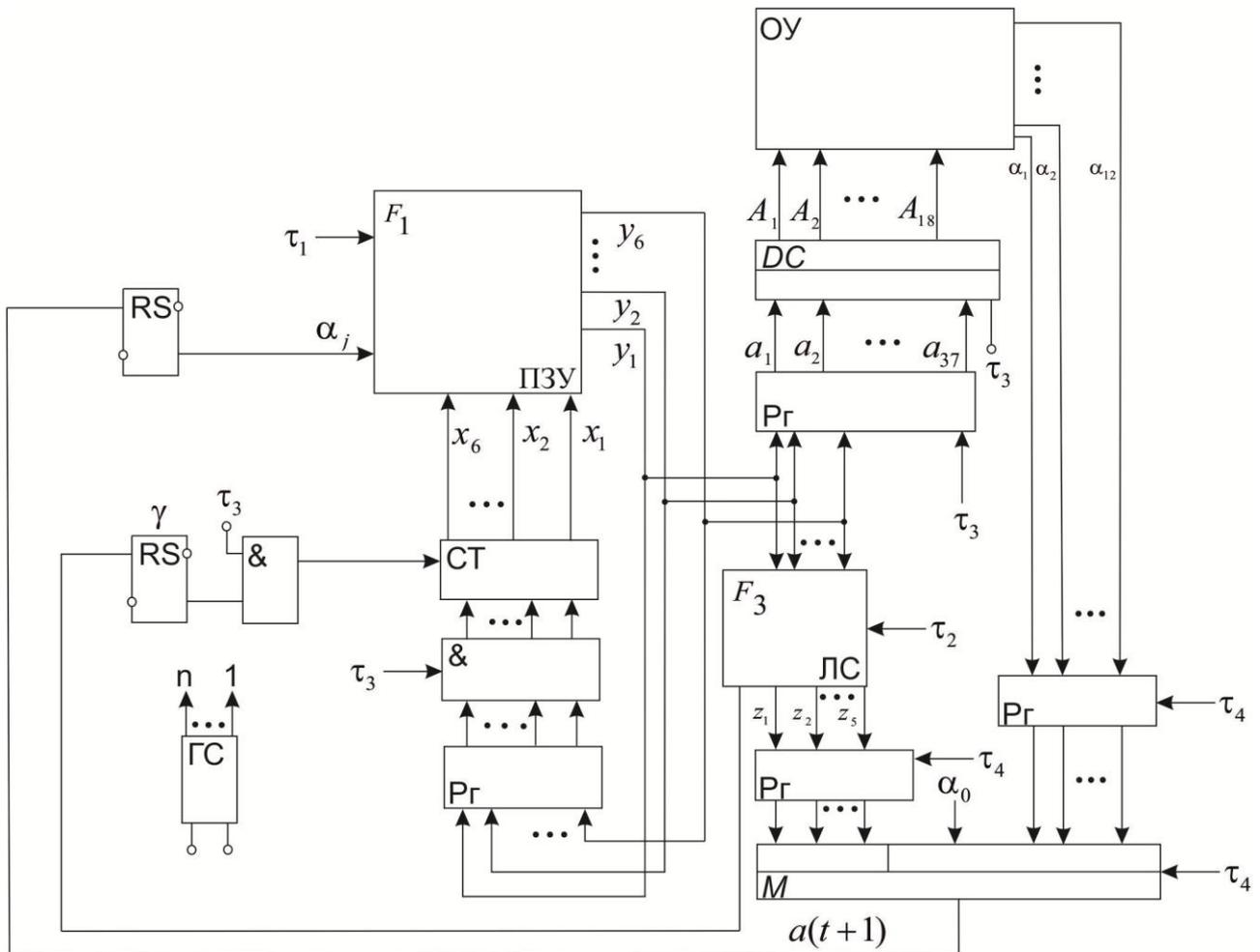


Рис. 14. Управляющий автомат автоматизированной системы со стековой памятью

Для рассматриваемой автоматизированной системы  $m=6$ ;  $q=19$ , тогда  $K = \frac{1}{3} 2^{19} = 1,7 \cdot 10^5$  бит.

Реализация систем булевых функций  $F_1$  и  $F_3$  в МУА (рис. 14) возможна на ПЛМ или ПЛИС. Однако верхняя оценка сложности функций  $F_1$  и  $F_3$  производится по объему ПЗУ, который для МУА равен  $W = m \cdot 2^{m+1} = 8 \cdot 2^7 = 1$  кбит, а для УА Мура  $V = m \cdot 2^{m+q} = 8 \cdot 2^{6+19} = 256$  Мбит. Сокращение объема в  $Q$  раз определяется соотношением  $Q = \frac{V}{W} = 2^{q-1} = 2^{18}$  раза для  $F_1$ . Функции  $F_2$  в УА нет, поэтому следует определить объем  $K = \frac{W}{R} = \frac{768}{192} = 4$  бита, где  $R = 2^{m+1} + 2^m = 3 \cdot 2^m = 192$  бита.

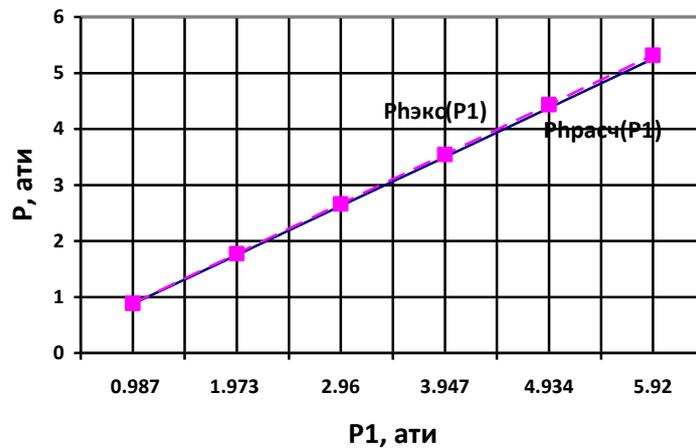
В четвертой главе приведено экспериментальное исследование системы очистки технологических сред с использованием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов (рис. 15, 16) и определены возможности применения автоматизированных систем очистки технологических сред в задачах железнодорожного транспорта и промышленности.

Анализ зависимости (рис. 15) позволяет сделать вывод о степени расхождения расчетных и экспериментальных результатов, которая не превышает 1,5%.

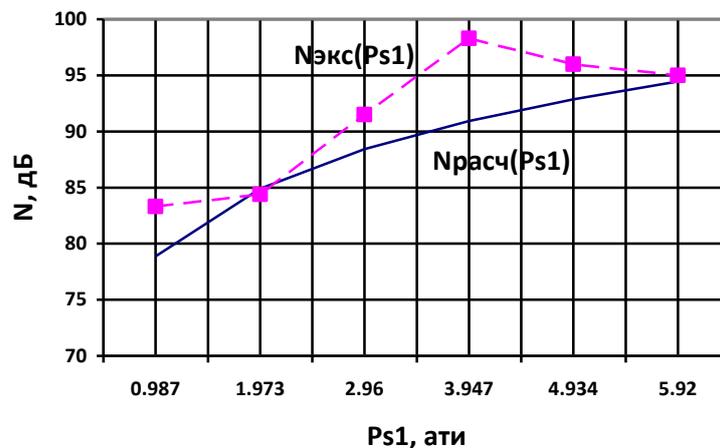
Анализ зависимости (рис. 16) позволяет сделать вывод о целесообразности выбора экспериментального уровня звука близким к максимуму функциональной зависимости. Степень расхождения расчетных и экспериментальных результатов не превышает 7,5%.

Анализ зависимостей (рис. 15, рис. 16) подтверждает высокий уровень соответствия математической модели реальному процессу, так как степень расхождения с экспериментальными данными не превышает 1,5-7,5%.

Очистка поверхности асфальта от снега и льда с использованием вихревой трубы позволила очистить, помимо верхнего не утрамбованного слоя снега, утрамбованные слои снега и льда частично полностью до поверхности асфальта. Очистка поверхности асфальта от снега и льда с использованием только сжатого воздуха позволила очистить только верхний слой не утрамбованного снега по сравнению с очисткой с применением вихревой трубы. Очистка глыбы льда от снега с применением ультразвуковой сирены позволила очистить глыбу льда от снега и отполировать обработанную часть ее поверхности.



**Рис. 15.** Зависимость  $P_{\text{расч}}$  расчетного и  $P_{\text{экc}}$  экспериментального давления горячего сжатого воздуха от давления  $P_1$  входного потока сжатого воздуха в вихревой трубе



**Рис. 16.** Зависимость  $N_{\text{расч}}$  расчетного и  $N_{\text{экc}}$  экспериментального уровня звука от давления  $P_{s1}$  входного потока сжатого воздуха в ультразвуковой сирене

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований решена актуальная проблема разработки и исследования комплексной системы вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов, и создания математической модели динамических процессов вихревой и ультразвуковой очистки технологических сред для синтеза автоматизированной системы очистки технологических сред с применением вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

В процессе исследований получены следующие научные результаты:

1. Предложена новая система очистки технологических сред (заявка на патент на полезную модель РФ №2015112888) путем комплексного взаимодействия вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

2. Впервые предложена аппаратная реализация систем очистки технологических сред путем комплексного взаимодействия вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов.

3. Впервые предложено сопоставление математических моделей динамических процессов и универсальных сетей Петри.

4. Предложена методика разработки автоматизированных систем очистки технологических сред с комплексным взаимодействием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов, и определения алгоритмов работы микропрограммного управления и контроля автоматизированной системы.

5. Предложена модификация методики синтеза управляющего автомата с внутренним мультиплексором и стековой памятью, позволяющая снизить объем памяти комбинационной схемы переходов в автомате, приблизительно в 2 раза.

6. Разработано программное обеспечение новой автоматизированной системы очистки технологических сред с комплексным взаимодействием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615404).

7. Проведено экспериментальное исследование вихревых и ультразвуковых параметров исполнительных механизмов в системе очистки технологических сред. Анализ результатов экспериментального исследования подтверждает высокий уровень соответствия математической модели реальному процессу, так как степень расхождения с экспериментальными данными не превышает 1,5-7,5%.

8. Автоматизированные системы очистки технологических сред с использованием вихревых и ультразвуковых исполнительных механизмов могут найти применение в задачах железнодорожного транспорта для очистки стрелочных переводов и рельс от снега и льда; в промышленности для очистки металлических, деревянных, каменных и бетонных поверхностей от различных загрязнений и покрытий в строительстве при очистке панелей и зданий; обеззараживания различных поверхностей; промежуточной ступени очистки сточных вод; опреснения морской воды; температурного разделения попутных нефтяных газов при добыче нефти; очистки воздуха от вредных примесей; создания специальных систем отопления помещений.

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедре «Автоматизации производственных процессов» ИрГУПС.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

– в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Филатов Д.А.** Математическое описание процессов в системе ультразвуковой очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта // Системы. Методы. Технологии. – Братск: БрГУ, 2012. – №4(16). – С. 82-86.

2. **Филатов Д.А.**, Мухопад Ю.Ф. Методика контроля и управления турбомеханизмами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – №4(36). – С. 117-125.

3. Мухопад Ю.Ф., **Филатов Д.А.**, Модель системы контроля и управления турбомеханизмами // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – Новосибирск: НГТУ, 2013. – №2(51) – С. 3-12.

4. Мельников А.В., Мухопад Ю.Ф., **Филатов Д.А.** Математическое моделирование сложных механических систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – №2(38). – С. 157-163.

5. Мухопад Ю.Ф., Мухопад А.Ю., **Филатов Д.А.**, Мельников А.В. Анализ мехатронных систем ударного действия // Фундаментальные исследования. – М.: 2013. – №8. Часть 6. – С. 1337-1344.

– авторские свидетельства и патенты:

6. **Филатов Д.А.**, Мухопад Ю.Ф., Ванчиков В.Ц., Пунсык-Намжилов Д.Ц., Марюхненко В.С. Устройство ультразвуковой очистки технологических сред с применением вихревого эффекта. Заявка на патент полезн. модель РФ №2015112888 от 10.04.2015.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615404. Программа управляющего автомата автоматизированной системы очистки технологических сред с применением вихревого эффекта и ультразвука / **Филатов Д. А.**, Марков Р.Ю., Мухопад А.Ю. – 2015.

– в зарубежных изданиях:

8. **Филатов Д.А.** Модель динамических процессов в системе ультразвуковой очистки технологических сред с применением вихревого эффекта. Перспективы разработки науки и техники – 2013: материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Перемышль, 2013. – Вып. 36. – С. 29-33.

– в других изданиях:

9. **Филатов Д.А.** Микропроцессорные системы управления турбо-механизмами. Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. трудов/под редакцией Ю.Ф. Мухопада. – Иркутск: ИрГУПС. – 2011. – Вып. 19. – С. 118-121.

10. **Филатов Д.А.** Микропроцессорные системы управления турбо-механизмами. Проблемы транспорта Восточной Сибири: материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов электромеханического факультета ИрГУПС. – Иркутск: ИрГУПС. – 2011. – С. 117-120.

11. **Филатов Д.А.** Структура микропроцессорной системы управления турбо-механизмами на базе микроконтроллера семейства HC08. Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. трудов/под редакцией Ю.Ф. Мухопада. – Иркутск: ИрГУПС. – 2011. – Вып. 20. – С. 53-60.

12. **Филатов Д.А.** Применение сирены, как ультразвукового излучателя на железной дороге. Проблемы транспорта Восточной Сибири: материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов электромеханического факультета ИрГУПС. – Иркутск: ИрГУПС. – 2013. – С. 64-66.

13. **Филатов Д.А.**, Мухопад Ю.Ф. Микропроцессорные системы управления и контроля турбо-механизмами. Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. трудов/под редакцией Ю.Ф. Мухопада. – Иркутск: ИрГУПС. – 2013. – Вып. 22. – С. 144-148.

14. Мухопад Ю.Ф., **Филатов Д.А.** Математическое моделирование системы управления турбо-механизмов. Проблемы транспорта Восточной Сибири: материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов электромеханического факультета ИрГУПС. – Иркутск: ИрГУПС. – 2013. – С. 103-108.

15. Мухопад Ю.Ф., **Филатов Д.А.** Математическое моделирование сложных механических систем. Информационные и математические технологии в науке и управлении // Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции "Информационные и математические технологии в науке и управлении". Часть I. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. – С. 203-208.

16. **Филатов Д.А.** Математическое моделирование динамических процессов в системе ультразвуковой очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта. Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. трудов/под редакцией Ю.Ф. Мухопада. – Иркутск: ИрГУПС. – 2013. – Вып. 23. – С. 121-127.

17. **Филатов Д.А.** Математическое моделирование сложных технических систем и технологических процессов. Структурное проектирование информационно-управляющих систем реального времени: отчет о научно-исследовательской работе. – Иркутск: ИрГУПС. – 2013. – № госрегистрации 01201251780. – С. 119-165.

18. **Филатов Д.А.** Экспериментальные исследования управляющих параметров в системе ультразвуковой очистки железнодорожных стрелок с применением вихревого эффекта. Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. трудов/под редакцией Ю.Ф. Мухопада. – Иркутск: ИрГУПС. – 2015. – Вып. 25. – С. 121-127.

19. Мухопад А.Ю., **Филатов Д.А.** Автоматическое управление турбо-механизмами // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в науке и технике». – Омск, 2015. – №2. – С. 13-22.