

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СУШКИ ОКРАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАШИН

Дмитрий Николаевич Афоничев  
Сергей Николаевич Пиляев  
Владимир Васильевич Василенко  
Игорь Игоревич Аксенов

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

При сушке покрашенных поверхностей машин происходит испарение паров растворителей краски и повышается концентрация вредных и опасных веществ в воздухе камеры, что требует периодического включения вытяжной вентиляции. Обычно используется двухпозиционный закон регулирования вытяжной вентиляции. Включение вытяжной вентиляции на полную производительность, особенно при низких температурах атмосферного воздуха, приводит к резкому снижению температуры воздуха в покрасочной камере и значительному повышению тока в нагревательном элементе. Для устранения указанных недостатков предложен новый алгоритм управления вентиляцией, который в первую очередь обеспечивает очистку воздуха от вредных примесей, а также поддержание требуемой температуры внутри камеры. Благодаря этому повышается качество сушки окрашиваемых поверхностей машин и снижаются затраты электроэнергии на поддержание необходимой температуры внутри камеры. Предложенный алгоритм реализуется системой автоматического управления, использующей нечеткую логику. Разработана функциональная схема системы управления вентиляцией покрасочной камеры, в которой установлены лингвистические переменные: выходные «Напряжение на нагревателе» и «Угол поворота рециркуляционной задвижки», а также входные «Концентрация паров краски», «Температура внутри камеры» и «Температура наружного воздуха». Построена математическая модель системы управления вентиляцией покрасочной камеры, которая включает модели: выделения паров лакокрасочных материалов в процессе покраски и сушки покрытия, нечеткого регулятора, нагревательного элемента, двигателя вентилятора калорифера, покрасочной камеры, смешения воздушных потоков с помощью рециркуляционной задвижки. Указанная математическая модель позволяет рационально выбрать функции принадлежности лингвистических переменных и построить матрицу правил нечеткого вывода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: покрасочная камера, сушка, вентиляция, управление, алгоритм, модель, нечеткая логика.

## IMPROVING THE QUALITY OF DRYING OF AUTOMOTIVE PAINTED SURFACES

Dmitriy N. Afonichev  
Sergey N. Pilyaev  
Vladimir V. Vasilenko  
Igor I. Aksenov

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

When drying automotive painted surfaces paint remover evaporates and the concentration of harmful and hazardous substances in the air of the paint-spraying booth increases, it is therefore necessary to bring into action intermittent exhaust ventilation which is commonly regulated by two-position control law. Ventilation direct-on-line switching, especially at low temperatures of atmospheric air, leads to dramatic drop in air temperature in the paint-spraying booth and significantly increases the current in the heating element. To eliminate these disadvantages the authors propose a new ventilation control algorithm, which not only provides purification of air from harmful impurities, but also allows keeping the temperature inside the booth within required settings. Consequently the quality of drying of the painted surfaces improves and power consumption for keeping the temperature inside the booth within required settings reduces. The proposed algorithm is implemented by the automatic control system based on fuzzy logic. The authors developed function scheme of ventilation control of the paint-spraying booth, which includes output linguistic variables («Voltage across heater» and «Angle of rotation of the recirculation valve»), as well as input linguistic variables («Concentration of paint vapor», «Temperature inside the booth» and «Atmospheric air temperature»). The authors also draw out mathematical model of the control system for paint-spraying booth ventilation that includes six models for: paint spraying

evaporation during painting and drying of the coating, fuzzy controller, heating element, fan motor heater, paint-spraying booth, airflow mixing with the recirculation valve. The proposed mathematical model allows rational choosing the membership functions of the linguistic variables and constructing fuzzy inference rules matrix.  
 KEY WORDS: paint-spraying booth, drying, ventilation, control, algorithm, model, fuzzy logic.

**Введение**

Покраска машин – это сложный технологический процесс, который осуществляется в специальных помещениях, называемых покрасочными камерами [2, 4, 5, 7]. При покраске машины в воздух выделяется большое количество вредных для человека и пожароопасных веществ, которые необходимо удалять для обеспечения нормальных условий работы. При этом содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК) и удовлетворять требованиям противопожарной безопасности. С другой стороны, для обеспечения качественной сушки окрашиваемых поверхностей в камере должны сохраняться определенная температура (45...90°C) и заданная скорость воздушного потока [5, 8, 9, 10]. Основным способом достижения допустимых параметров технологического процесса покраски является применение приточно-вытяжной вентиляции покрасочной камеры. Обычно серийные покрасочные камеры комплектуются теплогенераторами на жидком топливе с соответствующими системами автоматического управления [2, 7, 8]. Источники тепла в виде электрических калориферов используются реже, и вопросы автоматизации вентиляции покрасочных камер с теплогенераторами на жидком топливе достаточно актуальны [2, 4, 7, 8, 9, 10].

**Материал и методы**

Рассмотрим схему покрасочной камеры (рис. 1).

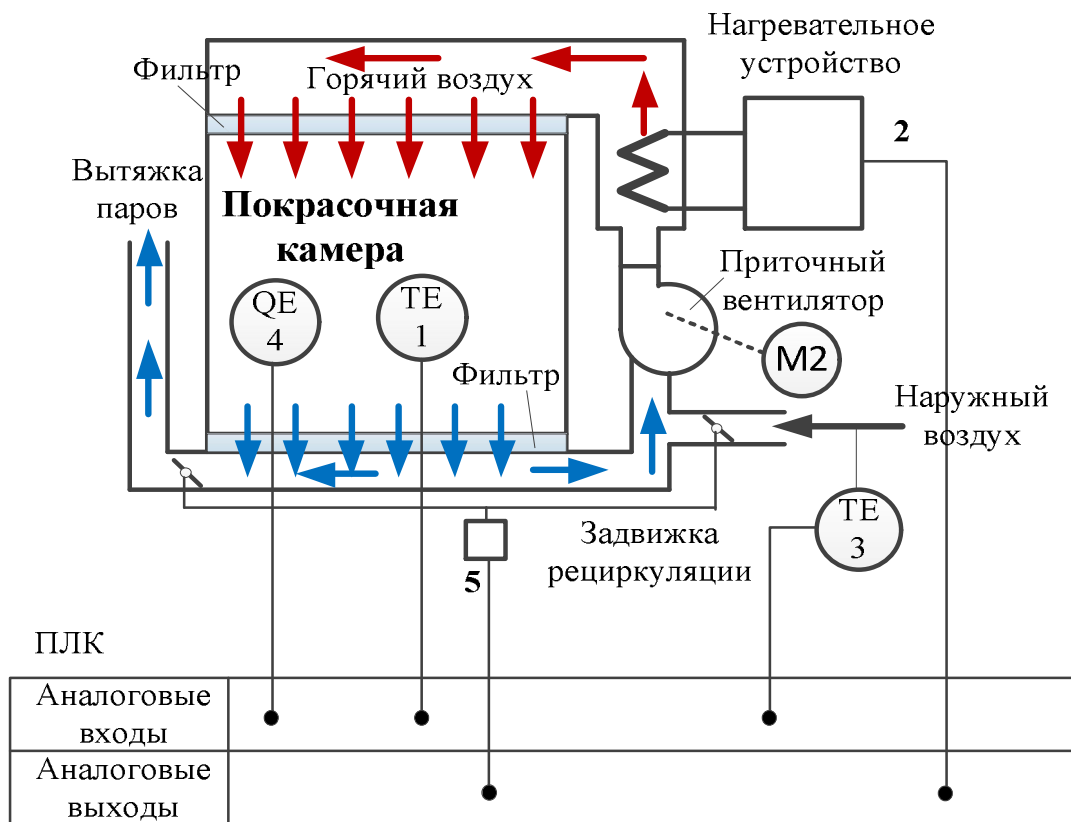


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема системы управления вентиляцией:  
 1 – датчик температуры воздуха внутри камеры; 2 – электрическое нагревательное устройство;  
 3 – датчик температуры воздуха снаружи; 4 – датчик количества паров лакокрасочных материалов;  
 5 – задвижка рециркуляции

Система состоит из неуправляемого приточного вентилятора, который подает воздух в электрическое нагревательное устройство 2. Температура нагревательных элементов изменяется с помощью тиристорного регулятора напряжения. Задвижка рециркуляции 5, приводимая в действие электрическим исполнительным механизмом, предназначена для перекрытия вытяжной вентиляции и обеспечения циркуляции горячего воздуха внутри камеры с целью снижения потребления электрической энергии нагревательным устройством.

Стандартные схемы управления предусматривают два режима работы вентиляции:

- включение вытяжки при осуществлении покраски и после покрасочных работ для удаления частиц лакокрасочных материалов;
- закрытие рециркуляционных задвижек и регулирование температуры теплого воздуха, циркулирующего в камере.

В представленной работе использован метод нечеткой логики [3].

### Результаты и их обсуждение

В процессе сушки покрашенных поверхностей происходит испарение паров растворителей краски и повышается концентрация различных горючих газов в воздухе камеры, что требует периодического включения вытяжной вентиляции. Обычно используется двухпозиционный закон регулирования вытяжной вентиляции. Включение вытяжной вентиляции на полную производительность, особенно при низких температурах атмосферного воздуха, приводит к резкому снижению температуры воздуха в камере и значительному повышению тока в нагревательном элементе из-за работы регулятора температуры. Следовательно, недостатками стандартного алгоритма управления вентиляцией покрасочной камеры можно считать следующие:

- наличие двух независимых контуров регулирования: по концентрации взрывоопасных веществ в воздухе и температуре воздуха в покрасочной камере;
- низкое качество регулирования состава воздуха из-за выбранного закона регулирования – релейного двухпозиционного;
- отсутствие взаимосвязи системы управления температурой со степенью загрязненности воздуха, из-за чего нарушаются требования технологического процесса;
- повышенный расход электроэнергии.

Для решения этих проблем предлагается новый алгоритм управления вентиляцией покрасочной камеры, где приоритет отдается очистке воздуха от вредных примесей, и с определенной степенью компромисса регулируется температура внутри камеры. Это позволит повысить качество сушки лакокрасочных покрытий и приведет к экономии электроэнергии. Данный алгоритм может быть реализован системой автоматического управления, использующей нечеткую логику [1, 3].

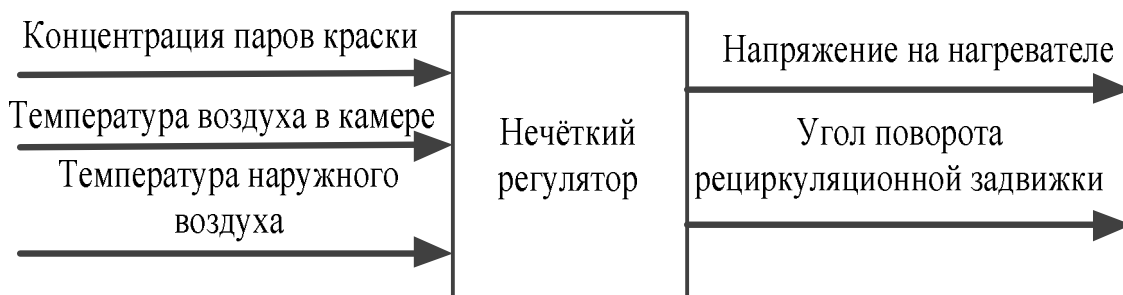


Рис. 2. Функциональная схема системы управления

Управление системой вентиляции осуществляется с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК), на котором реализован нечеткий регулятор [6]. Входными сигналами системы управления являются показания датчика количества паров лакокрасочных материалов QE 4 и датчиков температуры воздуха TE внутри 1 и снаружи 3 покрасочной камеры. С аналоговых выходов ПЛК подается управляющий сигнал на тиристорный блок нагревательного элемента 2 и привод рециркуляционной задвижки 5 (см. рис. 1).

На рисунке 2 представлена функциональная схема предложенной системы управления. Выходными переменными являются лингвистические переменные «Напряжение на нагревателе» и «Угол поворота рециркуляционной задвижки», а входными переменными приняты лингвистические переменные: «Концентрация паров краски», «Температура внутри камеры» и «Температура наружного воздуха». Для рационального выбора функций принадлежности лингвистических переменных и построения матрицы правил нечеткого вывода разработана математическая модель системы управления вентиляцией покрасочной камеры, структурная схема которой представлена на рисунке 3.

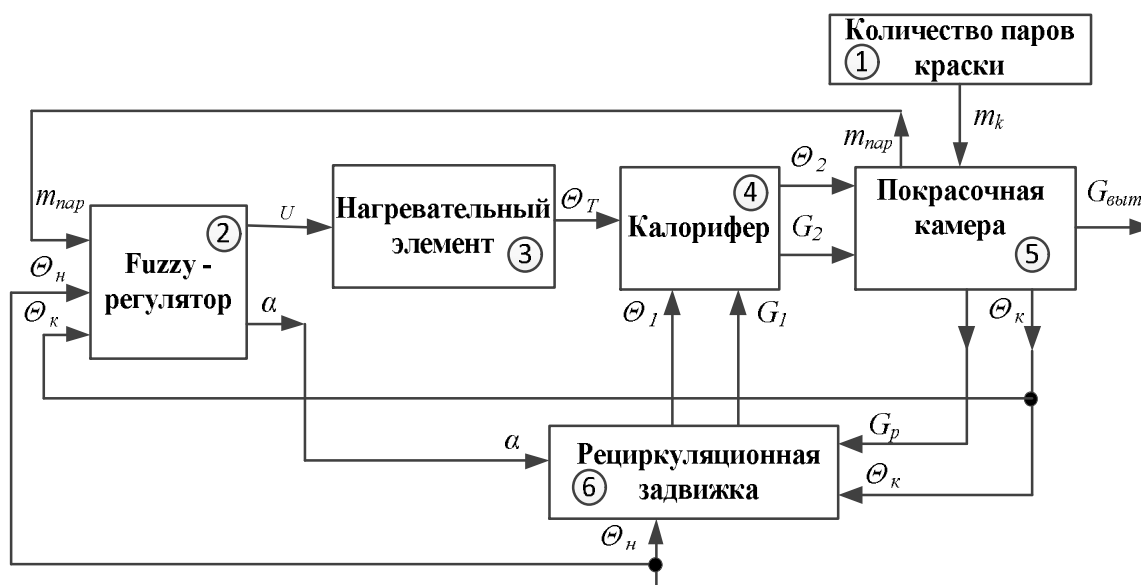


Рис. 3. Структурная схема математической модели системы управления вентиляцией покрасочной камеры

Модель состоит из шести блоков, в которой первый блок представляет собой модель выделения паров лакокрасочных материалов в процессе покраски и сушки покрытия; второй – модель нечеткого регулятора, третий – модель нагревательного элемента; четвертый – модель двигателя вентилятора калорифера; пятый – математическую модель покрасочной камеры; шестой – модель смешения воздушных потоков с помощью рециркуляционной задвижки.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения параметров модели:

$m_k$  – количество паров краски, поступающих в камеру во время технологического процесса;

$m_{нар}$  – количество паров краски в атмосфере камеры;

$G_{выт}$  – расход воздуха в вытяжной трубе;

$G_1$  – расход воздуха на входе в калорифер;

$\Theta_1$  – температура воздуха на входе в калорифер;

$\Theta_n$  – температура воздуха снаружи покрасочной камеры;

$\Theta_k$  – температура воздуха внутри покрасочной камеры;

$G_2, \Theta_2$  – расход и температура воздуха на входе покрасочной камеры;

$G_p$  – расход воздуха из камеры через рециркуляционную задвижку;

$\Theta_T$  – температура нагревательного элемента;

$U$  – напряжение на нагревательном элементе;

$\alpha$  – угол поворота рециркуляционной задвижки.

Исследования математической модели показали успешную работу предложенной системы автоматического управления, соответствующую заявленным критериям.

### **Выводы**

1. Выявленные недостатки стандартного алгоритма управления вентиляцией покрасочной камеры позволили предложить новый алгоритм на основе нечеткой логики, который предполагает в первую очередь очистку воздуха от вредных примесей, а также регулирование температуры в камере. Это позволит повысить качество сушки лакокрасочных покрытий и экономить электроэнергию.

2. Предложенная система управления вентиляцией покрасочной камеры в виде нечеткого регулятора имеет выходные лингвистические переменные: «Напряжение на нагревателе» и «Угол поворота рециркуляционной задвижки», и входные лингвистические переменные: «Концентрация паров краски», «Температура внутри камеры» и «Температура наружного воздуха».

3. Предложенная математическая модель системы управления вентиляцией покрасочной камеры обеспечивает рациональный выбор функций принадлежности лингвистических переменных и построение матрицы правил нечеткого вывода.

### Библиографический список

1. Афоничев Д.Н. Система автоматического управления вентиляцией в помещениях с вредными выбросами в воздух / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сб. науч. тр. по матер. междунар. заочной науч.-практ. конф. – 2015. – Т. 3. – № 9-2 (20-2). – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2015. – С. 324–328.
2. Болгов И.В. Инфраструктура предприятий сервиса / И.В. Болгов, А.П. Агарков. – Москва : Издательский центр «Академия», 2007. – 288 с.
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
4. Карташов В.П. Организация технического обслуживания и ремонта автомобилей / В.П. Карташов, В.М. Мальцев. – Москва : Транспорт, 1979. – 215 с.
5. Напольский Г.М. Технологический расчет и планировка станций технического обслуживания автомобилей / Г.М. Напольский, А.А. Солнцев. – Москва : Московский автомобильно-дорожный институт (государственный технический университет), 2003. – 53 с.
6. Основы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами / С.Н. Пиляев, П.О. Гуков, Д.Н. Афоничев, Р.М. Панов. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2013. – 187 с.
7. Проектирование предприятий технического сервиса / Кравченко И.Н. и др. – Санкт-Петербург : Изд-во «Лань», 2015. – 352 с.
8. Технологическое оборудование для технического обслуживания и ремонта легковых автомобилей : справочник / Попржедзинский Р.А. и др. – Москва : Транспорт, 1988. – 176 с.
9. Черепанов С.С. Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве : в 2 ч. / С.С. Черепанов. – Москва : ГОСНИТИ, 1986. – Ч. 1. – 144 с.
10. Яговкин А.И. Организация производства технического обслуживания и ремонта машин / А.И. Яговкин. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 400 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 253-75-35, E-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Сергей Николаевич Пиляев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 253-75-35, E-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Владимир Васильевич Василенко – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 253-78-61, E-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Игорь Игоревич Аксенов – старший преподаватель кафедры электротехники и автоматики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 253-75-35, E-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 13.09.2016

Дата принятия к печати 20.09.2016

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Dmitriy N. Afonichev – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-75-35, E-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Sergey N. Pilyaev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-75-35, E-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Vladimir V. Vasilenko – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. (473) 253-78-61, E-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Igor I. Aksenov – Senior Lecturer, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-75-35, E-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Date of receipt 13.09.2016

Date of admittance 20.09.2016