

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

*Научно-технический
и производственный журнал*

(24) 5 / 2022

**POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY**

Scientific & Technical Journal

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2022
Т.24, № 5
Сентябрь-Октябрь
ISSN 1998-9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В журнале публикуются работы, соответствующие группе специальностей 05.14.00 – «Энергетика», 05.09.00 – «Электротехника», 05.11.00 – «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы».

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы. Язык публикаций: русский, английский.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ИВШИН И.В.

КАСИМОВ В.А.

ГОЛЕНИЦЕВ-КУТУЗОВ В.А.

ДОВГУН В.П.

ГРАЧЕВА Е.И.

ИЛЮШИН П.В.

САФИН А.Р.

МЕЩЕРЯКОВ В.Н.

STANIMIR VALTSHEV

RENTIUS RADU DUMITRU

KOLCUN MICHAEL

БОЧКАРЕВ И.В.

БРЯКИН И.В.

СУСЛОВ К.В.

ФЕДОТОВ А.И.

ЗВЕРЕВА Э.Р.

ЩИННИКОВ П.А.

МИНГАЛЕЕВА Г.Р.

ВАНЬКОВ Ю.В.

АРАКЕЛЯН Э.К.

ПАВЛОВ Г.И.

ДМИТРИЕВ А.В.

БОРУШ О.В.

ЛАПТЕВ А.Г.

ЯКИМОВ Н.Д.

ІЛІУА К.ІЛІЕВ

НИКОЛАЕВА Л.А.

КАЛАЙДА М.Л.

БОРИСОВ А.В.

АНДРЕЕВ В.П.

КОРНИЛОВ В.Ю.

КОЗЕЛКОВ О.В.

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-82947 от 31.03.2022 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 697.9 / 039

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ФИЛЬТРАХ ГРУБОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ В ОКРАСОЧНЫХ КАМЕРАХ

Зинуров В.Э.¹, Биккулов Р.Я.¹, Дмитриев А.В.¹, Дмитриева О.С.², Николаев А.Н.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи проводились экспериментальные исследования. Для исключения погрешностей во время исследований, вызванных браком или иными причинами, использовалось по 3 образца каждого из фильтров грубой и тонкой очистки (чистого и отработанного). Для определения расчетной скорости была собрана экспериментальная установка, представленная в работе, включающая в себя воздухопровод, вентилятор для нагнетания воздуха, патрубков для измерения избыточного давления перед исследуемым фильтром, отверстие для сброса воздуха, образцы фильтров, вентиляционную решетку и измерительные приборы – дифференциальный манометр testo 510i, анемометр testo 405i. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, проанализировано изменение перепада давления в воздуховоде при использовании отработанных и чистых фильтров грубой и тонкой очистки. Показано, что увеличение их эксплуатационного срока службы возможно с использованием мультивихревого сепаратора, который может быть установлен в качестве предварительной ступени очистки. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Расчетная скорость газового потока при использовании фильтров грубой очистки составляет не более 2 м/с. Расчетная скорость газового потока при использовании фильтров тонкой очистки составляет не более 0,5 м/с. Сравнение различия перепада давления в воздуховоде при использовании грубых и тонких (отработанных и чистых) фильтров показывает, что в большей степени запыленному потоку подвержены фильтры грубой очистки, т.е. основная доля частиц в запыленном потоке на предприятии с окрасочными камерами представляет собой относительно крупные частицы. Гидравлическое сопротивление увеличивается в 1,58 раза.

Ключевые слова: *фильтр тонкой очистки; фильтр грубой очистки; мультивихревой сепаратор; окрасочные камеры; твердые мелкодисперсные частицы.*

Благодарности: *Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП – 3577.2022.1.*

Для цитирования: Зинуров В.Э., Биккулов Р.Я., Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Николаев А.Н. Определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности в окрасочных камерах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12.

DETERMINATION OF THE DESIGN VELOCITY OF THE GAS FLOW IN COARSE AND FINE FILTERS WITH VARYING DEGREES OF CONTAMINATION IN THE PAINT BOOTHS

VE. Zinurov¹, RJa. Bikkulov¹, AV. Dmitriev¹, OS. Dmitrieva², AN. Nikolaev²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru

Abstract: *OBJECT.* Determination of the design velocity of the gas flow in coarse and fine filters with varying degrees of contamination. *METHODS.* We carried experimental studies out to solve the problem. To exclude errors during the studies caused by marriage or other reasons, 3 samples of each of the coarse and fine filters (clean and used) were used. To determine the design speed, an experimental installation was assembled, presented in the work, which included an air duct, an air injection fan, a nozzle for measuring excess pressure in front of the filter under study, an air vent hole, filter samples, a ventilation grate and measuring instruments – a differential pressure gauge testo 510i and an anemometer testo 405i. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, analyzes the change in the pressure drop in the duct when using spent and clean coarse and fine filters. They showed that an increase in their operational life is possible with the use of a multi-vortex separator, which can be installed as a preliminary stage of purification. *CONCLUSION.* The estimated gas flow velocity when using coarse filters is only 2 m/s. The estimated gas flow velocity when using fine filters is only 0.5 m/s. A comparison of the difference in the pressure drop in the duct when using coarse and fine (spent and clean) filters shows that coarse filters are more susceptible to dusty flow, i.e. the bulk of particles in the dusty flow at an enterprise with paint chambers are relatively large particles. Hydraulic resistance increases by 1.58 times.

Keywords: fine filter; coarse filter; multi-vortex separator; paint chambers; fine solid particles.

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation to young scientists and postgraduates SP–3577.2022.1.

For citation: Zinurov VE, Bikkulov RJa, Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Nikolaev AN. Determination of the design velocity of the gas flow in coarse and fine filters with varying degrees of contamination in the paint booths. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(5):3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12.

Введение. Литературный обзор

Производство автомобилей является сложным процессом, включающим в себя множество объектов, процессов и источников первичной (топливо и электричество) и вторичной (пар, сжатый воздух, охлажденная и горячая вода) энергии. Причем самым энергоемким процессом является стадия окраски (от 48 до 60%) [1], поскольку системы управления воздухом, подающие воздух в покрасочные камеры, потребляют больше всего энергии. Эти системы имеют решающее значение для контроля температуры и влажности, в которых они обеспечивают качество окраски конечного продукта, предотвращая появления дефектов краски и, таким образом, избегая дополнительных затрат на переработку, а также для обеспечения производительности труда работников за счет поддержания оптимальных микроклиматических условий [2]. Большие объемы воздуха, необходимые для покрасочных камер, рабочих площадок и печей, требуют использования электричества для работы вентиляторов, в то время как дизельное топливо в основном используется для нагрева воздуха как для окрасочной камеры, так и для работы печи [3]. Потребление энергии при подаче воздуха в окрасочную камеру в пределах требуемого технологией диапазона температуры и влажности также зависит от типа краски, на водной основе или на основе растворителей. Именно от этих параметров зависит конечный результат окрашивания, устранение нежелательных дефектов на покрытии изделия при испарении краски после ее нанесения [4].

Причем современными производителями предлагается множество вариантов исполнения окрасочных камер, определяющую роль в выборе играют такие факторы как –

цели использования производством, особенности климата, место расположения, технические параметры, обслуживание специализированного оборудования камеры, подбор фильтрующих материалов. За очистку воздуха от ненужных примесей отвечают воздушные фильтры, которые бывают различной конфигурации и имеют разный срок замены. График обслуживания окрасочной камеры следует выстраивать исходя из интенсивности использования объекта. Частая замена воздушных фильтров окупится при полной загрузке камеры. В противном случае, делать это можно несколько реже. Для экономии средств, фильтры грубой очистки можно продувать и использовать повторно, но делать это рекомендуется не более раза. Фильтры тонкой очистки и вовсе не подлежат восстановлению [5].

Традиционная автомобильная краска, как правило, состоит из четырех химических ингредиентов: носителя, смолы, добавок и пигментов [1, 6]. Основными вредоносными соединениями, помимо летучих органических веществ, для здоровья человека являются пигменты, содержащие тяжелые металлические соединения (свинец, ртуть, мышьяк, кадмий и др.) [7, 8]. Поскольку большая часть распыляемой краски содержит опасные соединения и потенциально легко воспламеняется, необходимо, проявляя особую осторожность, своевременно и правильно утилизировать фильтры после использования в соответствии с экологическими требованиями во избежание нанесения вреда окружающей среде. Также не стоит забывать, что около 80-90% выбросов при производстве автомобилей приходится на стадию покраски [9], приводящей к образованию различных видов отходов. В частности, нанесение красок путем распыления является основным источником лакокрасочных шламов, летучих органических веществ, твердых и жидких отходов, которые относятся к 3 классу опасности [10].

Из-за большого количества добавленных химических веществ шлам отходов не подлежит восстановлению, представляет значительный риск для окружающей среды и обычно отправляется на свалки опасных отходов или сжигается. Влияние загрязнения почвы на биоразнообразие в случае безответственной утилизации не оценимо [1, 11].

Учитывая вышесказанное, на предприятия возлагаются обязательства по мониторингу и снижению воздействия отходов производства на окружающую среду, сбору, систематизации и систематическому анализу данных об их экологических характеристиках. Это влияет на экономические затраты предприятия, являясь дополнительной проблемой к закупке дорогостоящих фильтрующих элементов. При этом не прекращаются поиски технических решений, позволяющих решить указанную проблему, с целью повышения энергоэффективности и экологичности процесса, снижения физического износа фильтров, а значит и продления срока их службы, что подтверждает актуальность выбранного исследования.

Несмотря на большое количество исследований в этой области такими учеными как *K.A. Nystrom*, *J. Sheppard* по способам восстановления фильтров окрасочной камеры путем их нагрева в печи для удаления летучих материалов, *R. Thelen*, *P. Фаскиев* по срокам замены фильтров при общем падении давления, *R. Joseph*, *M. Powell*, по использованию рециркуляции в системах вентиляции, *Ю. Папко*, *A. Giampieri* по рекуперации удаляемого воздуха из окрасочной камеры, *А. Зиганшин*, *В. Посохин*, *Д. Милоевич* по подаче воздуха только в «активные модули» камеры, где происходит окраска изделия, решение проблемы создания энергоэффективных систем вентиляции окрасочных камер с целью обеспечения требуемого воздухообмена в соответствии с санитарными нормами, всё еще представляет большую сложность [2, 3, 5, 7, 12]. В настоящей работе предлагается определить расчетную скорость потока воздуха в фильтрах грубой и тонкой очистки окрасочной камеры при разной степени загрязненности фильтров. При несвоевременной замене фильтров, они становятся существенным препятствием на пути воздуха из окрасочной камеры, что приводит к увеличению давления в камере и сокращению воздухообмена, создавая различные аэродинамические сопротивления и нагрузку на электродвигатели вентиляционной системы.

Анализ современного состояния проблемы.

Научная новизна работы состоит в получении обобщенных зависимостей по перепаду давления в воздуховоде окрасочной камеры от скорости воздуха при использовании разных фильтров. Практическая значимость и новизна результатов исследования заключается в том, что разработана конструкция мультивихревого сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц из потока воздуха, результаты исследований его работы могут быть использованы для решения задач экономии средств на оплату электроэнергии, закупку, а также монтаж фильтров грубой и тонкой очистки

при эксплуатации системы вентиляции окрасочной камеры.

Постановка задачи исследования

Актуальной задачей является увеличение эксплуатационного срока службы фильтров грубой и тонкой очистки, что позволит снизить экономические издержки на их закупку и монтаж, который сопровождается вынужденной остановкой окрасочных камер, и прочих работ, осуществляемых в целях поддержания системы кондиционирования окрасочных камер в рабочем состоянии и снижения экологической нагрузки. Для решения данной задачи авторами работы в ранее опубликованной работе [13] была предложена конструкция мультивихревого сепаратора (рис. 1). Устройство предлагается использовать перед фильтрами, что продлит их эксплуатационный ресурс.

Сепарацию частиц из потока в мультивихревом сепараторе можно описать следующим образом. Запыленный газовый поток поступает во внутреннюю часть сепарационных элементов 4 мультивихревого сепаратора через прорези квадратной формы в основании 2. Далее поток газа постепенно проходит через прямоугольные прорези 5 и попадает в область между сепарационными элементами 4. При этом каждая струя газа при прохождении через прямоугольную прорезь 5 разделяется на две равные части, каждая из которых движется в противоположную относительно друг друга сторону, образуя два вихря маленького диаметра, что позволяет получить центробежные силы высоких значений, достаточных для выбивания из потока частиц размером менее 10 мкм. Круглые отверстия 6, сделанные в съемной крышке 3, способствуют упорядоченности вихревой структуры. При вращении множества маленьких вихрей частицы выбиваются из потока и попадают на поверхность стенок мультивихревого сепаратора, прилипая к ним. В работах [14, 15] представлена конструкция сепаратора «труба в трубе», разработанная по аналогичному принципу вращения вихрей. Однако их вращение происходит в межтрубном пространстве. Для окрасочных камер сепаратор был конструктивно изменен для удобства его интеграции в их производственные площадки.

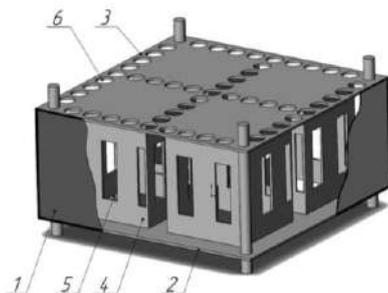


Рис. 1. Трехмерная модель мультивихревого сепаратора: 1 – обечайка устройства; 2 – основание устройства; 3 – съемная крышка; 4 – сепарационные элементы; 5 – прямоугольные прорези; 6 – круглые отверстия.

Fig. 1. Three-dimensional model of the multivortex separator: 1 - the shell of the device; 2 - the base of the device; 3 - a removable cover; 4 - separation elements; 5 - rectangular slots; 6 - circular holes.

Важной задачей является проведение множества исследований для доработки и усовершенствования мультивихревого сепаратора, причем необходимо определить расчетную скорость газового потока при соответствующем перепаде давления при использовании фильтров грубой и тонкой очистки в окрасочных камерах с учетом степени их загрязненности.

Целью данной работы является определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности.

Материалы и методы

В качестве предмета исследования использовались две различные марки напольных фильтров, применяемых в окрасочной камере предприятия ООО «КАМАТЕК», для удаления твердых загрязнений (рис. 2, а и с). Улавливание из загрязненного потока воздуха наиболее крупных частиц проводилось фильтрами грубой очистки – *Volz filter MRGrun3-20-75 Paint stop G3*. Плотность данного фильтра составляет 220-240 г/м², класс фильтрации – G3, что соответствует эффективности улавливания твердых частиц размером более 0,4 мкм равной 70-80% и менее 0,4 мкм равной 20-35%. Толщина каждого фильтра грубой очистки составляет 70 мм, рабочая температура – 180°C (рис. 2, а). После фильтров грубой очистки запыленный поток поступал в фильтры тонкой очистки – *Zauber Air* серии 500M. Они изготавливаются из термически скрепленного полиэфирного

волокна и обработаны специальным составом, который практически исключает отрыв мелкодисперсных частиц от поверхности фильтра. Высокая прочность данных фильтров обеспечивается удерживающей сеткой, расположенной с тыльной стороны. Класс фильтрации F5, плотность составляет 380 г/м^2 , удерживающая способность – 99%, термостойкость до 100°C , влагостойкость до 100% относительной влажности, толщина материала составляет 22 мм. Производителями фильтров тонкой очистки отмечается, что срок службы в среднем составляет 1200–1500 часов работы, при условии своевременной замены фильтров грубой очистки.

Для исследований были подготовлены образцы чистых и отработанных фильтров (рис. 2) грубой и тонкой очистки, которые были использованы в ходе промышленных испытаний на предприятии ООО «КАМАТЕК» в окрасочной линии поточного типа.

Для исключения погрешностей во время исследований, вызванных браком или иными причинами, использовалось по три образца каждого из фильтров грубой и тонкой очистки (чистого и отработанного). Таким образом, общее количество, задействованных в исследованиях образцов фильтров, составило 12 шт. Диаметр каждого образца был равен $100 \pm 1 \text{ мм}$.

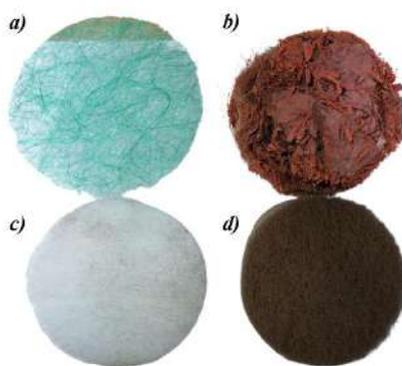


Рис. 2. Фильтры тонкой и грубой очистки до и после эксплуатационного периода: *a* – чистый фильтр грубой очистки; *b* – отработанный фильтр грубой очистки; *c* – чистый фильтр тонкой очистки; *d* – отработанный фильтр тонкой очистки

Fig.2. Fine and coarse filters before and after the operating period: a - clean coarse filter; b - coarse waste filter; c - clean fine filter; d - fine waste filter

Для определения расчетной скорости была собрана экспериментальная установка, представленная на рисунке 3. Она включала в себя вентилятор, который был вставлен в воздуховод 1, патрубок для измерения давления 2 перед исследуемым образцом фильтра в воздуховоде 1, отверстие для сброса воздуха 3, вентиляционную решетку 4, дифференциальный манометр *testo 510i* 5, который подсоединялся к патрубку 2 и анемометр *testo 405i* (на рис. 3 не показан). В ходе проведения экспериментов отверстие для сброса воздуха 3 частично перекрывалось или полностью открывалось, что позволяло осуществлять сброс воздуха в окружающую среду. Таким образом, была получена более широкая выборка значений скорости газа и перепада давления в воздуховоде.

Методика проведения экспериментов была следующей. Воздух нагнетался с помощью вентилятора, двигаясь по воздуховоду 1, проходил через исследуемый образец фильтра, установленный перед вентиляционной решеткой 4, и через нее выходил в окружающую среду. Скорость воздуха варьировалась переключением нескольких режимов работы вентилятора и открытием отверстия для сброса воздуха 3. Числовые значения перепада давления измерялись дифференциальным манометром 5 в режиме реального времени и передавались на персональный компьютер. Также в режиме реального времени измерялась скорость газового потока в воздуховоде с помощью анемометра *testo 405i* (рис. 3).

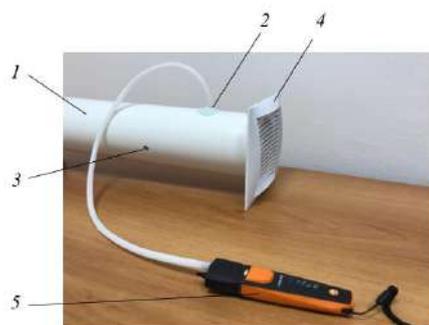


Рис. 3. Основная часть экспериментальной установки для проведения исследований фильтров грубой и тонкой очистки: 1 – воздуховод; 2 – патрубок для измерения избыточного давления перед исследуемым фильтром; 3 – отверстие для сброса воздуха; 4 – вентиляционная решетка; 5 – дифференциальный манометр *testo 510i*.

*Fig. 3. Main part of the experimental facility for the examination of coarse and fine filters: 1 - pipe for the measurement of excess pressure before the tested filter; 3 - air discharge hole; 4 - ventilation grating; 5 - differential pressure gauge *testo 510i*.*

Как известно, производители фильтров дают рекомендации по их замене на основе показаний манометра для контроля состояния перепада давления [16]. Если фильтр оказывается забитым, перепад давления на нем увеличивается, что приведет к уменьшению давления в окрасочной камере. При обработке экспериментальных данных перепад давления в воздуховоде определялся в режиме реального времени дифференциальным манометром *testo 510i* по следующему выражению:

$$\Delta p = p_5 - p_0,$$

где p_5 – избыточное давление в воздуховоде, Па; p_0 – атмосферное давление окружающей среды, Па.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований показали, что с увеличением скорости потока воздуха повышается перепад давления в воздуховоде при использовании исследуемых образцов фильтров грубой и тонкой очистки (чистых и отработанных), а именно при использовании отработанных фильтров грубой очистки перепад давления в воздуховоде был больше в среднем в 3,24 раза относительно чистых фильтров грубой очистки. При этом скорость воздуха варьировалась от 0,05 до 5,7 и 0,05 до 16,54 м/с при использовании отработанных и чистых фильтров грубой очистки соответственно, для обоих случаев применялись все режимы работы вентилятора (рис. 4). При использовании отработанных фильтров тонкой очистки перепад давления в воздуховоде был больше в среднем в 1,33 раза относительно чистых фильтров грубой очистки (рис. 5). Можно отметить, что сравнение перепада давления в воздуховоде при использовании грубых и тонких (отработанных и чистых) фильтров показывает, что в большей степени загрязненному потоку подвержены фильтры грубой очистки, т.е. основная доля частиц в потоке воздуховода окрасочных камер представляет собой относительно крупные частицы. В таком случае, применение мультивихревого сепаратора может существенно продлить остаточный срок службы фильтров.

В ходе проведения расчетов было установлено, что расчетная скорость воздуха при использовании фильтров грубой очистки составляет не более 2 м/с, т.к. рекомендуемый перепад давления при их замене составляет около 400 Па (рис. 4). Расчетная скорость воздуха при использовании фильтров тонкой очистки составляет не более 0,5 м/с, т.к. рекомендуемый перепад давления при их замене составляет около 450 Па (рис. 5).

С одной стороны, анализ результатов измерения перепада давления в воздуховоде при использовании отработанных и чистых фильтров тонкой очистки свидетельствует о незначительном увеличении гидравлического сопротивления при их загрязнении. С другой стороны, это объясняется наличием специального состава, нанесенного на чистые фильтры тонкой очистки, состав которого не раскрывается в коммерческих целях. Как отмечалось ранее, он позволяет практически исключить отрыв мелкодисперсных частиц от поверхности фильтра. Стоит отметить, что при адгезии (прилипанию) твердых частиц к поверхности фильтра происходит частичная замена специального состава и частиц. При попадании частиц на поверхность фильтра нанесенный структурный слой специального состава частично разрушается, и некоторая его часть улетучивается и уносится газом

(рис. 5).

Перепад давления в воздуховоде при использовании отработанных и чистых фильтров грубой очистки составляет в среднем 1597 и 493 Па соответственно (рис. 4, а). Можно отметить, что значение перепада давления при использовании трех образцов чистых фильтров грубой очистки, которые были вырезаны из различных мест единого фильтра практически не отличается, что свидетельствует о его целостности и однородности. При этом анализ перепада давления в воздуховоде при использовании трех образцов отработанных фильтров грубой очистки показывает, что в различных местах единого фильтра перепад давления различается, что свидетельствует о различной степени загрязненности образцов и об неоднородном распределении концентрации твердых частиц в газовом потоке по сечению воздуховода (рис. 4, а). Рисунок 4, б наиболее наглядно демонстрирует значения перепада давления до 1000 Па в воздуховоде при использовании отработанных и чистых фильтров грубой очистки.

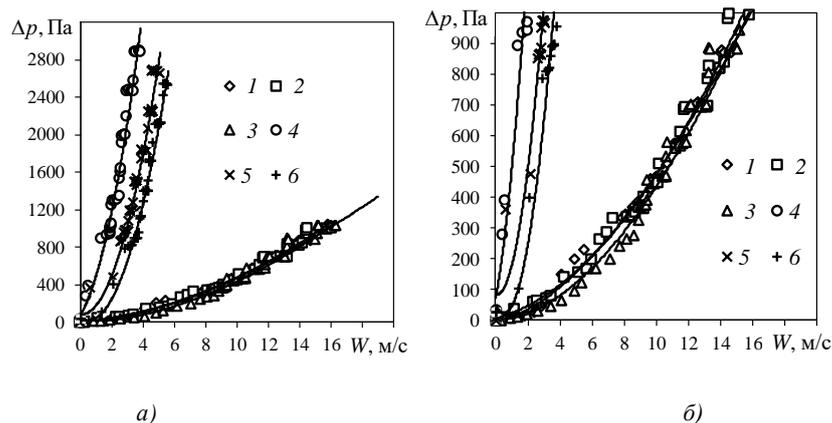


Рис. 4. Изменение перепада давления в воздуховоде (а) до 3200 Па; б) до 1000 Па) от скорости воздуха в зависимости от образца используемого чистого или грязного фильтра грубой очистки: 1 – чистый фильтр № 1; 2 – чистый фильтр № 2; 3 – чистый фильтр № 3; 4 – грязный фильтр № 1; 5 – грязный фильтр № 2; 6 – грязный фильтр № 3.

Fig. 4. Change of pressure difference in duct (a) to 3200 Pa; b) to 1000 Pa) from air speed depending on the sample of the clean or dirty rough filter used: 1 - clean filter 1; 2 - clean filter 2; 3 - clean filter 3; 4 - dirty filter 1; 5 - dirty filter 2; 6 - dirty filter 3.

При использовании отработанных и чистых фильтров тонкой очистки происходит мгновенный рост перепада давления в воздуховоде при относительно низких скоростях воздуха до 0,5–1 м/с. После чего перепад давления увеличивается с ростом скорости потока воздуха практически монотонно. При этом перепад давления в воздуховоде при использовании 3 образцов отработанных и чистых фильтров грубой очистки составляет в среднем 1420 Па и 1066 Па соответственно (рис. 5).

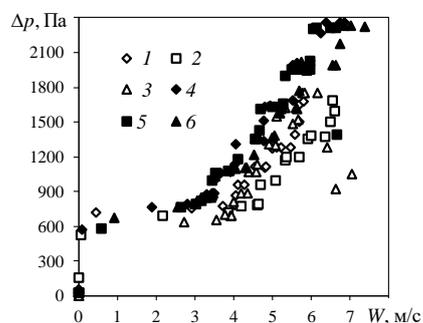


Рис. 5. Изменение перепада давления в воздуховоде от скорости газового потока в зависимости от образца используемого чистого или отработанного фильтра тонкой очистки: 1 – чистый фильтр № 1; 2 – чистый фильтр № 2; 3 – чистый фильтр № 3; 4 – отработанный фильтр № 1; 5 – отработанный фильтр № 2; 6 – отработанный фильтр № 3

Fig. 5. Variation of the pressure difference in the duct from the gas flow rate depending on the sample of the clean or waste fine filter used: 1 - clean filter 1; 2 - clean filter 2; 3 - clean filter 3; 4 - waste filter 1; 5 - waste filter 2; 6 - waste filter 3

Таким образом, проведенные исследования показали, что процесс увеличения перепада давления в воздуховоде при использовании грубых и тонких фильтров очистки является в большей степени различным, т.к. в первом случае, грубые фильтры очистки забиваются твердыми частицами и увеличивается их гидравлическое сопротивление, во втором случае, тонкие фильтры очистки имеют в своем составе специальный состав, что обеспечивает частичную замену в структуре данного состава на адгезированных на поверхности фильтра твердых мелкодисперсных частиц, что приводит к незначительному увеличению их гидравлического сопротивления относительно фильтров грубой очистки. Также были установлены числовые значения диапазонов расчетных скоростей для фильтров грубой и тонкой очистки, что позволяет в перспективе провести численные и экспериментальные исследования и разработать инженерную методику для мультивихревого сепаратора, которые интенсифицируют эффективность улавливания твердых частиц из воздуха мультивихревым сепаратором в окрасочных камерах перед дорогостоящими фильтрами и позволит продлить их эксплуатационный срок службы.

Выводы

На основе проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Расчетная скорость воздуха при использовании фильтров грубой очистки составляет не более 2 м/с.
2. Расчетная скорость воздуха при использовании фильтров тонкой очистки составляет не более 0,5 м/с.
3. Сравнение различия перепада давления в воздуховоде при использовании грубых и тонких (отработанных и чистых) фильтров показывает, что в большей степени запыленному потоку подвержены фильтры грубой очистки, т.е. основная доля частиц в запыленном потоке на предприятии с окрасочными камерами представляет собой относительно крупные частицы. Гидравлическое сопротивление увеличивается в 1,58 раза.
4. Мультивихревой сепаратор может быть использован с целью снижения экономических издержек при обслуживании камер и увеличения эксплуатационного срока службы фильтров. На основе данных по изменению перепада давления в воздуховоде будет исключена вероятность нерекондованных режимов работы окрасочной камеры.

Литература

1. Rivera J.L., Reyes-Carrillo T. A life cycle assessment framework for the evaluation of automobile paint shops // *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 115. pp. 75–87.
2. Giampieri A., Ma Z., Ling-Chin J., et al. A techno-economic evaluation of low-grade excess heat recovery and liquid desiccant-based temperature and humidity control in automotive paint shops // *Energy Conversion and Management*. 2022. V. 261. pp. 115654.
3. Giampieri A., Ling-Chin J., Ma Z., et al. A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective // *Applied Energy*. 2020. V. 261. pp. 114074.
4. Боровик Д.А. Эволюция и будущее технологий автомобильной покраски // *Молодой ученый*. 2020. № 32(322). С. 18–22.
5. Фаскиев Р.С. Мониторинг режимов вентиляции окрасочно-сушильных камер для ремонтной окраски автомобилей // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014. № 10(171). С. 206–212.
6. Патрушева Т.Н., Чурбакова О.В., Петров С.К., и др. Методы защиты персонала и окружающей среды при нанесении лаков и красок // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 9-1. С. 20–24.
7. Joseph R. Ventilation and paint filtration requirements for spray booths // *Metal Finishing*. 2007. V. 105, N7-8. pp. 82–84.
8. Осипова Л.Э., Осипов Э.В. К расчету вытяжной эжекционной системы вентиляции окрасочной камеры // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 2(40). С. 190–197.
9. Mohtashami R., Shang J.Q. Treatment of automotive paint wastewater in continuous-flow electroflotation reactor // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 218. pp. 335–346.
10. Ruffino B., Farina A., Dalmazzo D., et al. Cost analysis and environmental assessment of recycling paint sludge in asphalt pavements // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. V. 28, N19. pp. 24628–24638.
11. Быков Е.А., Муранов В.А. Проблемы переработки и обезвреживания отходов,

образующихся при производстве и потреблении лакокрасочных материалов // Лакокрасочные материалы и их применение. 1991. № 3. С. 37–39.

12. Зиганшин А.М., Сафиуллин Р.Г., Посохин В.Н. О вентиляции окрасочно-сушильных камер. Сообщение 1 // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 4 (19). С. 84–93.

13. Биккулов Р.Я., Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., и др. Очистка воздушных потоков от мелкодисперсных частиц в окрасочных камерах // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 10–14. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-12-10-14.

14. Биккулов Р.Я., Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., и др. Оценка времени работы сепарационного устройства с элементами квадратной формы при очистке запыленного потока покрасочной камеры // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25. № 1. С. 32–35.

15. Зинуров В.Э., Мадышев И.Н., Ивахненко А.Р., и др. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 205–211.

16. Гавриленков А.М., Бредихин Л.С., Сафаралиев Р.Р. Совершенствование конструкции узла очистки воздуха, удаляемого из окрасочной камеры // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1-1 (6). С. 76–78.

Авторы публикации

Зинуров Вадим Эдуардович – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Биккулов Рустем Ядкарович – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудования пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Николаев Андрей Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудования пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

References

1. Rivera J.L., Reyes-Carrillo T. A life cycle assessment framework for the evaluation of automobile paint shops. *Journal of Cleaner Production*, 2016;115:75–87. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.027

2. Giampieri A., Ma Z., Ling-Chin J., et al. A techno-economic evaluation of low-grade excess heat recovery and liquid desiccant-based temperature and humidity control in automotive paint shops. *Energy Conversion and Management*, 2022;261:115654. doi: 10.1016/j.enconman.2022.115654

3. Giampieri A., Ling-Chin J., Ma Z., et al. A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy*, 2020;261:114074. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114074

4. Borovik D.A. Evolyutsiya i budushchee tekhnologii avtomobil'noi pokraski. *Molodoi uchenyi*. 2020;322(32):18–22.

5. Faskiev R.S. Monitoring rezhimov ventilyatsii okrasochno-sushil'nykh kamer dlya remontnoi okraski avtomobilei. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014;171(10):206–212.

6. Patrusheva T.N., Churbakova O.V., Petrov S.K., et al. Metody zashchity personala i okruzhayushchei sredy pri nanesenii lakov i krasok. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2016; 9-1: 20–24.

7. Joseph R. Ventilation and paint filtration requirements for spray booths. *Metal*

Finishing, 2007;105(7-8):82–84. doi: 10.1016/S0026-0576(07)80185-1.

8. Osipova L.E., Osipov E.V. K raschetu vytyazhnoi ezhektsionnoi sistemy ventilyatsii okrasochnoi kamery. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017;40(2):190–197.

9. Mohtashami R., Shang J.Q. Treatment of automotive paint wastewater in continuous-flow electroflotation reactor. *Journal of Cleaner Production*. 2019;218:335–346. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.326.

10. Ruffino B., Farina A., Dalmazzo D., et al. Cost analysis and environmental assessment of recycling paint sludge in asphalt pavements. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(19):24628–24638. doi: 10.1007/s11356-020-10037-2

11. Bykov E.A., Muranov V.A. Problemy pererabotki i obezvrezhvaniya otkhodov, obrazuyushchikhsya pri proizvodstve i potreblenii lakokrasochnykh materialov. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie*. 1991;(3):37–39.

12. Ziganshin A.M., Safiullin R.G., Posokhin V.N. O ventilyatsii okrasochno-sushil'nykh kamer. Soobshchenie 1. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2016;19(4):84–93. doi: 10.21285/2227-2917-2016-4-89-93

13. Bikkulov R., Dmitrieva O., Dmitriev A., et al. Cleaning Air Streams from Fine Particles in Paint Booths. *Ecology and Industry of Russia*. 2021;25(12):10–14. doi: 10.18412/1816-0395-2021-12-10-14

14. Bikkulov R.Ya., Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., et al. Otsenka vremeni raboty separatsionnogo ustroystva s elementami kvadratnoi formy pri ochildke zapylennogo potoka pokrasochnoi kamery. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2022;25(1):32–35.

15. Zinurov V.E., Madyshev I.N., Ivakhnenko A.R., et al. Razrabotka klassifikatora s soosno raspolozhennymi trubami dlya razdeleniya sypuchego materiala na osnove silikagelya. *Polzunovskii vestnik*. 2021;(2):205–211. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029

16. Gavrilentov A.M., Bredikhin L.S., Safaraliev R.R. Sovershenstvovanie konstruktssii uzla ochildki vozdukha, udalyaemogo iz okrasochnoi kamery. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoi oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychainykh situatsii*. 2015;6(1-1):76–78.

Authors of the publication

Vadim E. Zinurov – Assistant of the Department «Theoretical Foundations of Heat Engineering» of Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia.

Rustem Ja. Bikkulov – Assistant of the Department «Theoretical Foundations of Heat Engineering» of Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia.

Andrey V. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Theoretical Foundations of Heat Engineering» of Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia.

Oksana S. Dmitrieva – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Department «Food Production Equipment» of Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Andrey N. Nikolaev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the Department «Food Production Equipment» of Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Получено

01.08.2022г.

Отредактировано

16.08.2022г.

Принято

23.08.2022г.