

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 697.921.4

EDN: <https://elibrary.ru/cwejmg>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Разработка устройства управления потоком воздуха для производственных и социальных зданий ОАО «РЖД»

С. Н. Наumenko✉, П. О. Мусерский

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены возможности снижения затрат на техническую эксплуатацию зданий, как решение одной из целевых задач ОАО «РЖД». За счет использования энергетически эффективных вентиляционных систем нормативные показатели воздушного потока могут быть обеспечены при меньших расходах тепловой и электрической энергии. Рассмотрены автоматизированные системы управления потоком воздуха приточной и вытяжной вентиляции. Анализ принципа действия этих систем позволил разработать опытный образец инновационного устройства и испытать его на различных объектах ОАО «РЖД», при этом достигнув уменьшения энергопотребления.

Материалы и методы. Применены методы натурных испытаний вентиляционной системы на стенде для фильтров очистки воздуха, поступающего в помещение пассажирского вагона, и натурных сравнительных испытаний на социальном объекте — здании санатория ОАО «РЖД».

Результаты. Научно обоснована целесообразность использования устройств регулирования воздушных потоков вентиляционных систем, сравнительные испытания которых, выполненные на производственных и социальных объектах ОАО «РЖД», по сравнению со штатными режимами работы вентиляции, показали надежную работу и стабильную экономию потребляемой электрической энергии.

Обсуждение и заключение. Результаты работы позволяют утверждать, что применение в системах вентиляции производственных и социальных зданий ОАО «РЖД» разработанного опытного образца устройства управления воздушным потоком обеспечит уменьшение потребляемой электроэнергии при сохранении нормированных параметров проходящих в воздуховодах объемов воздуха.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: производственные и социальные здания, система вентиляции зданий, регуляторы потока воздуха, трубка Пито, скорость потока, экономия электроэнергии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Наumenko С. Н., Мусерский П. О. Разработка устройства управления потоком воздуха для производственных и социальных зданий ОАО «РЖД» // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 1. С. 21–28.

Original article

UDK 697.921.4

EDN: <https://elibrary.ru/cwejmg>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



Development of air flow control device for industrial and social buildings of JSC Russian Railways

Sergey N. Naumenko✉, Prokopi O. Muserskiy

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors considered ways of reducing costs of building maintenance as a solution of one of the target tasks of the JSC Russian Railways. The air flow standards may be achieved with lower heat and electricity consumption through the use of energy efficient ventilation systems. Automated systems for controlling the flow of air supply and exhaust ventilation were observed. Analysis of the principle of operation of these systems allowed to develop a prototype of an innovative device and test it on various facilities of JSC Russian Railways, thereby achieving reduction of energy consumption.

Materials and methods. Methods of field tests of ventilation system on a stand for filters to purify air entering passenger car space and field comparative tests at sanatorium of JSC Russian Railways were applied.

Results. The feasibility of using air flow control devices of ventilation systems, comparative tests of which performed on production and social facilities of JSC Russian Railways, were scientifically proven, demonstrated reliable operation and stable savings in energy consumption, compared to the standard operating modes of ventilation.

Discussion and conclusion. The results of the work enable to affirm that application of the developed prototype of the air flow control device in ventilation systems of production and social buildings of JSC Russian Railways would ensure reduction of energy consumption while maintaining normalised parameters of the air volumes passing through the air ducts.

KEYWORDS: industrial and social buildings, ventilation systems, air flow regulators, Pitot tube, flow speed, energy saving

FOR CITATION: Naumenko S. N., Muserskiy P. O. Development of air flow control device for industrial and social buildings of JSC Russian Railways. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(1):21–28. (In Russ.).

✉ naumenko.sergey@vniizht.ru (S.N. Naumenko)

© Naumenko S. N., Muserskiy P. O., 2025

Введение. ОАО «РЖД» является крупнейшим владельцем инфраструктуры в России, в том числе зданий различного назначения: производственных, общественных, жилых. От профессиональной технической эксплуатации зданий во многом зависит обеспечение технологических процессов, удовлетворенность внешних и внутренних клиентов, а также оптимальная себестоимость продуктов ОАО «РЖД». Так, по состоянию на начало 2020 года Компания располагала 99,3 тыс. зданий, в совокупных расходах на техническую эксплуатацию которых, в частности, за 2019 год, затраты, относимые на себестоимость перевозок, составили 5,5 % или 83,1 млрд. рублей.

В связи с этим одной из стратегических целей ОАО «РЖД» является уменьшение себестоимости технической эксплуатации зданий до 2030 года на 7 %, в том числе снижение их энергоемкости за счет оптимизации расходов на электрическую и тепловую энергию не менее чем на 10 %¹.

Известно, что наибольшую часть общих расходов здания занимают эксплуатационные затраты. При этом автоматизация зданий позволяет сократить эксплуатационные затраты по меньшей мере на 20 % [1, 2].

Здесь не лишним будет заметить, что существенная доля энергетических затрат в зданиях приходится на работу устройств вентиляции, состоящей преимущественно из приточных, вытяжных или приточно-вытяжных комбинированных систем. Так, например, приточные системы вентиляции потребляют 50–60 % всей электроэнергии здания [3]. Учитывая, что ОАО «РЖД» является крупнейшим работодателем страны, создающим комфортные условия для труда и отдыха своих работников, переход на экономичные режимы работы вентиляторов позволит достичь ожидаемых результатов в области энергоемкости зданий. Целью исследования является оценка возможности снижения энергоемкости зданий ОАО «РЖД» за счет использования энергетически эффективных вентиляционных систем, позволяющих обеспечивать нормативные показатели воздушного потока.

Типы автоматизированных систем. В развитых странах мира широко используются различные типы автоматизированных систем, позволяющих контролировать неизменность показателей воздушного потока или индивидуальные тепло-влажностные параметры вентилируемых помещений. Наиболее распространенные системы — CAV, обеспечивающие постоянный расход подаваемого в помещение воздуха, и более

сложные — VAV, регулирующие переменный расход воздуха для каждого вида помещений² [4].

Регуляторы постоянного расхода CAV (Constant Air Volume) появились на отечественном рынке вентиляционного оборудования относительно недавно и во многих компаниях еще только входят в стандартную практику проектирования и сооружения систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Конструктивно регулятор CAV представляет собой автономный механический клапан, который монтируется на участке воздуховода и работает в режиме самобалансировки, причем подключение к внешнему источнику электропитания не требуется [5].

В зависимости от величины давления в воздушной сети регулятор CAV создает дополнительное аэродинамическое сопротивление так, чтобы обеспечить заданный расход воздуха через воздуховод, в котором он установлен. Чем выше давление воздуха в сети перед регулятором, тем больше будет и сопротивление регулятора, и наоборот — при уменьшении давления регулятор снижает свое сопротивление. Механизм самобалансировки при этом обеспечивает постоянный расход воздуха независимо от любых колебаний давления.

Существует целый ряд задач, присущих производственным помещениям ОАО «РЖД», которые просто невозможно реализовать без применения регуляторов CAV, в частности, если требуется обеспечить:

- постоянный расход воздуха на отдельных участках вентиляционной сети независимо от изменения рабочих параметров всей системы;
- стабильную подачу и (или) вытяжку контролируемого объема воздуха в производственных помещениях, в которых требуется гарантированный дебаланс, в том числе для поддержания избыточного давления или разряжения;
- ограничение максимального объема вытяжного воздуха, удаляемого через местные отсосы периодического действия;
- выполнение модернизации отдельной ветви системы вентиляции, не нарушая работы системы в целом.

При всей полезности регуляторов CAV их применение, тем не менее, не позволяет должным образом минимизировать потребление электроэнергии. Для этих целей, как правило, применяют частотные преобразователи (инверторы), характеристики которых настраивают на стабильную работу вентиляционной системы с характерными для нее средними

¹ Об утверждении Стратегии технической эксплуатации зданий и сооружений ОАО «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года: распоряжение ОАО «РЖД» от 22.04.2021. № 896/р. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 14.02.2025).

² Томи Ристимяки. Энергетическая эффективность: Honeywell [Электронный ресурс]. URL: <https://masters.donntu.ru/2017/etf/rozuvanov/library/h-energy-VDF.pdf> (дата обращения: 14.02.2025).

техническими параметрами³. В такой системе мотор-вентилятор соединен с преобразователем частоты. Преобразователь контролирует скорость мотор-вентилятора для постоянного поддержания необходимого объема/давления воздуха, передаваемого по системе каналов. Уровень давления контролируется датчиком, осуществляя таким путем обратную связь с преобразователем частоты. В подобных системах экономия электроэнергии достигает 15 % [6].

Широко известны также регуляторы переменного расхода воздуха — VAV (Variable Air Volume)⁴. Основной принцип действия вентиляционной системы с регулятором VAV понятен из рис. 1, где VAV (5) автоматически управляет положением заслонки (6), устанавливаемой для подачи индивидуального объема воздуха в помещение, создавая при этом давление в воздуховоде, значение которого определяется по датчику давления (4) и преобразуется с помощью автоматического регулятора давления (3), оснащенного коммутатором, в эквивалентный электрический сигнал, передающийся частотному преобразователю (2), позволяющему изменять скорость вращения вентилятора, минимизируя таким образом потребляемую мощность двигателя (1) ровно настолько, чтобы давление в воздуховоде вернулось на прежний уровень.

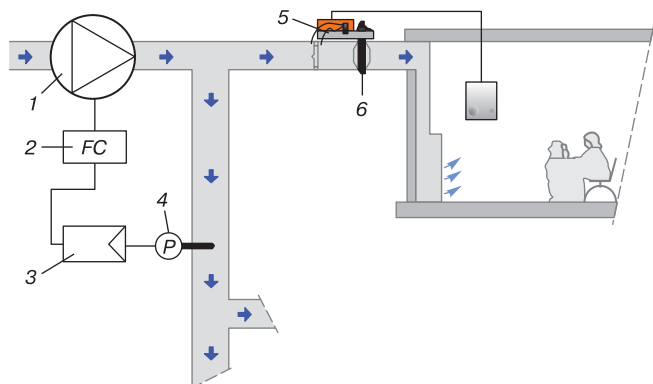


Рис. 1. Схема управления воздушными потоками системы VAV*:

- 1 — двигатель вентилятора; 2 — частотный преобразователь;
3 — автоматический регулятор давления; 4 — датчик давления;
5 — регулятор переменного потока VAV; 6 — заслонка

* Источник: разработан авторами

Fig. 1. Scheme of VAV air flow control system*:

- 1 — fan motor, 2 — frequency drive, 3 — automatic pressure controller,
4 — pressure control device, 5 — VAV variable flow regulator, 6 — valve

* Source: developed by the authors

Это достаточно сложные и дорогостоящие автоматизированные системы различной иерархии, с помощью которых представляется возможным организовать подачу воздуха по потребности в зависимости, в том числе, от определенных внешних факторов (температура, влажность, CO_2 и пр.) и которые позволяют экономить от 30 % и более потребляемой электроэнергии⁵. Они могут быть интересны для бизнес-центров, номеров гостиниц и т.д., то есть для тех помещений, в которых необходимо гарантированное достижение индивидуальных параметров комфорта [7–10].

Вместе с тем, на предприятиях ОАО «РЖД» производственной или социальной сферы широко востребованными могут стать менее сложные и энергетически эффективные вентиляционные системы, позволяющие обеспечивать нормативные показатели воздушного потока в целом для зданий.

Материалы и методы. Оценка известных технических и конструктивных решений, рассмотренных выше, а также CAV и VAV регуляторов позволила определить несколько иные принципы управления потоком воздуха. В частности, используемый в указанных системах в качестве опорного значения датчик давления, настраиваемый на некую среднюю величину, не обладает возможностью фиксировать мгновенные изменения физических параметров поступающего в систему воздуха, а их учет позволяет обеспечить дополнительную экономию энергии.

В связи с этим разработано и предложено новое техническое решение, направленное на повышение надежности и достоверности учета изменений физических параметров воздушного потока, необходимого для поддержания заданного расхода воздуха, пропорционального массовому расходу, что позволяет при сохранении нормированного потока воздуха в большей степени оптимизировать потребление электроэнергии по критерию минимизации энергозатрат⁶.

В процессе работы был разработан и изготовлен опытный образец устройства, условно названный «Поток» (рис. 2).

Устройство управления потоком воздуха содержит преобразователь 2 скорости потока воздуха в напряжение постоянного тока, источник образцового напряжения 3 и дифференциальный усилитель 4 разности двух напряжений постоянного тока, которые размещены в отдельном корпусе 1. Устройство содержит датчик

³ Системы вентиляции. Пример типового применения ПИ-регулятора: ООО «АРМОС» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.technowell.ru/info/articles/sistemy-ventilyatsii-primer-tipovogo-primeneniya-pi-regulyatora/?ysclid=m3yeiue2ht352483351> (дата обращения: 14.02.2025).

⁴ VAV-система: Breezart Shop [сайт]. URL: <https://breezart.shop/about/vav/> (дата обращения: 14.02.2025).

⁵ Регуляторы переменного расхода воздуха — энергоэффективная система индивидуального климат-контроля в каждом помещении: Systemair [сайт]. URL: https://smtrading.ru/upload/goods/nVzee3cxObbL_Optima_VAV.pdf (дата обращения: 14.02.2025).

⁶ Патент № 2824693 Российская Федерация, МПК F24F 11/63, F24F 7/00. Способ управления потоком воздуха в вентиляционной установке и устройство для его реализации: № 2023118010: заявл. 07.07.2023, опубл. 12.08.2024 / Науменко С.Н., Крылов А.А., Мусерский П.О.; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. EDN: <https://elibrary.ru/dazpsi>.

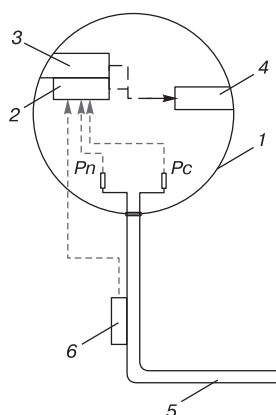


Рис. 2. Схемное решение устройства управления потоком воздуха*:
1 — корпус устройства; 2 — преобразователь скорости потока воздуха в напряжение; 3 — источник образцового напряжения; 4 — дифференциальный усилитель разности двух напряжений постоянного тока; 5 — датчик динамического давления; 6 — датчик температуры
* Источник: разработан авторами

Fig. 2. Circuit solution for the air flow controller*:
1 — body; 2 — air flow rate to voltage converter; 3 — sample voltage source; 4 — differential difference amplifier of two DC voltages; 5 — dynamic pressure sensor; 6 — temperature sensor
* Source: developed by the authors

динамического давления 5, выполненный в виде напорной трубки Пито, и датчик температуры 6.

Следует заметить, что сегодня на рынке широко представлены цифровые датчики динамического давления⁷, но для опытного образца была использована трубка Пито.

Принцип действия устройства основан на формировании выходного электрического сигнала, связанного линейной зависимостью с массовым расходом воздуха и описываемый выражением:

$$Q_M = \rho \cdot V \cdot S, \quad (1)$$

где Q_M — массовый расход воздуха, кг/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; V — средняя скорость потока, м/с; S — площадь сечения потока, м².

В качестве измерительной информации фиксируются основные параметры потока воздуха вентиляционной системы: температура, общее и статическое давление, определяемые, соответственно, с помощью термометра сопротивления и трубки Пито.

На рис. 3. приведена функциональная схема работы устройства, где P_D — значение динамического давления, измеряемое с помощью установленной в воздуховоде трубки Пито, мм вод.ст., определяемое как:

$$P_D = P_o - P_c, \quad (2)$$

где P_o — общее давление; P_c — статическое давление; t — значение температуры воздушного потока, измеряемое с помощью термометра сопротивления, °C; $V = f(P_D; t \text{ } ^\circ\text{C}) / U_v$ — преобразователь скорости потока воздуха в напряжение постоянного тока (из м/с в В); U_{ref} — источник образцового напряжения, задающий значение скорости потока воздуха; ДУ — дифференциальный усилитель разности двух напряжений постоянного тока с коэффициентом усиления $k = 6$; U/F — преобразователь постоянного напряжения в частоту управления и питания асинхронного двигателя вентилятора; Motor — асинхронный двигатель вентилятора.

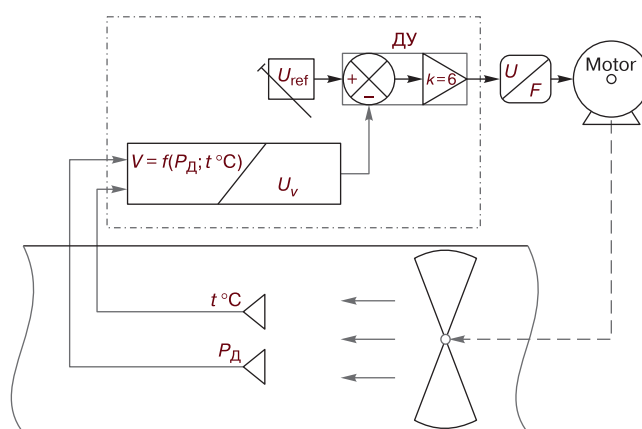


Рис. 3. Функциональная схема работы устройства «Поток»*
* Источник: разработан авторами

Fig. 3. Functional scheme of Potok device*
* Source: developed by the authors

В опытном образце устройства применен принцип регулирования частоты питающего напряжения двигателя вентилятора при использовании двух параметров: задающего образцового напряжения U_{ref} , устанавливаемого при его настройке, и выходного напряжения U_v измерительного канала, создаваемого устройством «Поток». Именно использование принципа регулирования частоты питающего напряжения двигателя вентилятора считается в ОАО «РЖД» одним из перспективных направлений снижения расхода электрической энергии, которое находит все более широкое применение⁸.

Поскольку воздух в вентилируемом помещении летом охлаждается, а зимой подогревается, в «Потоке» предусмотрена функция регулирования изменения плотности воздуха ρ от его температуры t° , выраженная как $(273 + t^\circ) / 293$. Эта функция при расчете скорости воздушного потока учитывает приведение

⁷ Датчики динамического давления: АО «Теплоприбор» [сайт]. URL: <https://xn--90ahjlpcccjdm.xn--p1ai/catalog/datchiki-dinamicheskogo-davleniya-zet-315-zet-801-802-803/?ysclid=m3zp34wo06761944163> (дата обращения: 14.02.2025).

⁸ Об утверждении Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года: Распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016. № 2537р [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 14.02.2025).

объёмного расхода холодного или горячего воздуха к нормальной температуре 20 °С.

Измерительный канал устройства позволяет формировать сигнал, стабилизирующий массовый расход воздушного потока, плотность которого изменяется в зависимости от температуры.

За счет уменьшения колебаний скорости потока воздуха, которые в результате приводят к снижению энергопотребления, что можно увидеть на рис. 4, устройство позволяет поддерживать заданные параметры микроклимата.



Рис. 4. Колебания скорости потока воздуха в различных системах*

* Источник: разработан авторами

Fig. 4. Air flow speed fluctuations in different systems*

* Source: developed by the authors

Результаты. Для апробации работы устройства был выбран следующий пилотный объект: стенд для испытания фильтров очистки воздуха, поступающего в помещение пассажирского вагона⁹. Стенд содержал приточный вентилятор с параметрами заявленной мощности $N_{\text{дв}} = 4$ кВт, силой тока $I = 8,5$ А и числом оборотов двигателя $n = 2800$ об/мин. Для проведения испытаний стенд был дополнительно оборудован частотным преобразователем Emotron FDU 2.0. В соответствии с программой испытаний первый этап включал в себя исследование работы вентиляционной системы в штатном исполнении, при этом на стенде последовательно моделировались режимы движения вагона (1–3) со скоростями 0, 50 и 100 км/ч соответственно. Цифровым анемометром Aktaком АТЕ-1034 измерялись параметры скорости потока воздуха в нагнетательном воздуховоде, а штатным ваттметром — потребляемая вентилятором мощность на каждом режиме моделируемой скорости.

На втором этапе испытания в нагнетательный воздухопровод был врезан опытный образец устройства «Поток», соединенный каналом связи с частотным

преобразователем Emotron FDU 2.0, и в течение трех суток проведены аналогичные измерения.

Результаты сравнительных испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний работы вентиляционной системы на стенде*

Table 1

Comparative results of ventilation system on test bench*

№ п/п	Частота вращения, Гц	Мощность двигателя вентилятора, кВт · ч	Скорость потока на линии нагнетания: мин.—макс., м/с	Режим моделирования движения вагона
Штатное исполнение стенда				
1	50	4,19–4,22	2,09–2,18	1
2	50	4,15–4,18	2,32–2,42	2
3	50	4,10–4,12	2,33–2,50	3
Штатное исполнение стенда с устройством «Поток»				
1	46,0–46,2	3,25–3,27	2,00–2,22	1
2	45,7–46,0	3,29–3,31	2,22–2,28	2
3	45,3–45,8	3,26–3,28	2,15–2,30	3

* Источник: данные авторов

* Source: authors data

В соответствии с программой испытаний были получены следующие результаты:

- потребляемая мощность двигателем вентилятора по штатному счетчику составила 4,7 кВт · ч.;
- потребляемая мощность двигателем вентилятора по штатному счетчику после установки устройства «Поток» составила 3,3 кВт · ч.

На основании полученных результатов был определен экономический эффект относительно работы системы вентиляции по штатной схеме управления потоком воздуха, в среднем равный 29 %.

Поиск пилотного объекта в одном из производственных зданий ОАО «РЖД» показал, что установленные в них вентиляционные системы практически не оборудованы частотными преобразователями, а расход воздуха контролируется традиционным образом — с помощью дросселей, клапанов или заслонок. В этом случае объемный расход воздуха регулируется без изменения скорости вращения двигателя, и последний все время работает на полной скорости. Поскольку в системах вентиляции необходимость в максимальных объемных расходах воздуха возникает достаточно редко, то при отсутствии регулирования скорости вращения расточительно тратится большое количество энергии.

⁹ Стенд испытания фильтров очистки воздуха, поступающего в вагон. Рабочая документация 0420.01.08.000СО. Принципиальные схемы и схемы соединений. Щиты управления: ПКБ филиал ФГУП ВНИИЖТ РФ, 2010.

Экспертная оценка показала, что вентиляционные системы более полно оснащены частотными преобразователями в зданиях, предназначенных для отдыха работников Компании, в связи с чем вторым pilotным объектом стал санаторий с лечением «Березовая роща» Дирекции социальной сферы Московской железной дороги, расположенный в п. Аксаково Московской области.

Сравнительные испытания проводились в марте 2020 г. в главном корпусе санатория в течение трех суток. В качестве объекта испытаний был выбран приточный вентилятор с параметрами заявленной мощности $N_{\text{дв}} = 3$ кВт, силой тока $I = 6,3$ А и частотой вращения двигателя $n = 1420$ об/мин.

Целью проведения испытаний являлось практическое подтверждение результатов уменьшения энергопотребления приточного вентилятора при управлении воздушным напором с помощью устройства «Поток» с сохранением фактической производительности. Результаты сравнительных испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний вентиляционной системы в санатории «Березовая роща»*

Table 2

Comparative test results of ventilation system in the Berezovaya Rocha sanatorium*

Режимы испытаний	Скорость потока воздуха, м/с	Температура наружного воздуха, °С	Потребляемая мощность двигателя, кВт·ч	Экономический эффект по активной энергии, %
Штатный режим работы вентилятора	1,4–2,2	–2	2,20	–
Штатный режим работы вентилятора с устройством «Поток»	1,5–2,1	–2	1,58	28

* Источник: данные авторов

* Source: authors data

В результате проведения испытаний было зафиксировано уменьшение энергопотребления приточного вентилятора по активной энергии.

Описанный выше способ управления потоком воздуха и устройство для его реализации анонсировались в г. Макао (Китайская Народная Республика) на международной выставке изобретений и инноваций, прошедшей в октябре 2024 года. По ее результатам инновации отмечены серебряной медалью¹⁰.

Обсуждение и заключение. Применение в системах вентиляции производственных и социальных зданий ОАО «РЖД» разработанного устройства «Поток» позволяет достичь уменьшения потребления электроэнергии при сохранении заданной скорости воздушного потока.

Использование устройств регулирования потока воздуха, реализующих разработанный способ, позволит существенно сэкономить затраты ОАО «РЖД» при его применении в системах вентиляции производственных и социально значимых зданий, увеличив при этом производительность труда работников Компании за счет создания заданных комфортных условий для труда и отдыха.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Бернстин Р. Полное управление зданием и его влияние на энергосбережение // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2008. № 4. С. 72–76.
- Bernstin R. Complete building management and its impact on energy conservation. *AVOK: ventilation, heating, air conditioning, heat supply, and building thermal physics*. 2008;(8):72–76. (In Russ.).
- Матросов Ю.А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения. М.: НИИСФ, 2008. 495 с. EDN: <https://elibrary.ru/qnntsf>.
- Matrosov Yu. A. *Energy saving in buildings*. The problem and ways to solve it. Moscow: NIISF; 2008. 495 p. (In Russ.).
- Ватин Н.И., Смотракова М.В. Технико-экономическое обоснование применения систем вентиляции с роторной рекуперацией тепла // ГОУВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Инженерно-строительный факультет, кафедра технологии, организации и экономики строительства, Изд-во СПбОДЗПП, 2003 г., 75 с.
- Vatin N.I., Smotrakova M.V. Feasibility study of the use of ventilation systems with rotary heat recovery. *St. Petersburg State Polytechnic University, Faculty of Civil Engineering, Department of Technology, Organization and Economics of Construction*. St-Pet.: SPbODZPP Publ.; 2003. 75 p. (In Russ.).
- Волков В.А. Регуляторы переменного расхода CAV [Электронный ресурс] // Мир климата. 2020. № 115. (дата обращения: 14.02.2025).
- Volkov V.A. Constant flow regulators CAV. *Climate World Magazine*. 2020;115. (In Russ.).
- Вильданов Р.Г., Вагапов М.Р., Фарваев И.Р. Разработка мероприятий по энергосбережению в системах промышленной

¹⁰ Изобретатели России и Китая укрепляют сотрудничество. [Электронный ресурс]. URL: <http://салон-архимед.рф/2024/macao-2024-summary> (дата обращения: 14.02.2025).

вентиляции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. EDN: <https://elibrary.ru/vidyvh>.

Vildanov R. G., Vagapov M. R., Farvaev I. R. Development of energy saving measures in industrial ventilation systems. *Modern problems of science and education*. 2015;1-1. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vidyvh>.

6. Вентиляция с переменным расходом воздуха для офисных зданий / А. Л. Наумов, Д. В. Капко // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2012. № 8. С. 16–21. EDN: <https://elibrary.ru/phgltl>.

Naumov A. L., Kapko D. V. Ventilation with variable air flow for office buildings. *AVOK: ventilation, heating, air conditioning, heat supply, and building thermal physics*. 2008;(8):16–21. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/phgltl>.

7. Lawrence T. Системы вентиляции, регулируемые по уровню потребности // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2005. № 5. С. 52–62.

Lawrence T. Ventilation systems, adjustable according to the level of demand. *AVOK: ventilation, heating, air conditioning, heat supply, and building thermal physics*. 2005;(5):52–62. (In Russ.).

8. Warden D. Регулирование расхода приточного воздуха по концентрации CO₂ // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2005. № 2. С. 72–81.

Warden D. Regulation of supply air flow by CO₂ concentration. *AVOK: ventilation, heating, air conditioning, heat supply, and building thermal physics*. 2005;(2):72–81. (In Russ.).

9. Кувшинов Ю. Я., Ткаченко Н. В. Прерывистый режим работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2011. № 5. С. 26–29. EDN: <https://elibrary.ru/nwgbst>.

Kuvshinov Yu. Ya., Tkachenko N. V. Intermittent operation of ventilation and air conditioning systems. *AVOK: ventilation, heating, air conditioning, heat supply, and building thermal physics*. 2011;(5):26–29. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/nwgbst>.

10. Оценка экономической эффективности применения систем вентиляции / Ш. Г. Хачалов [и др.] // Экономика и предпринимательство. 2023. № 7 (156). С. 1084–1087. EDN: <https://www.elibrary.ru/dddhlu>.

Khachalov S. G., Ivanov O. D., Zaitsev R. I., Katunina A. I., Iliassov D. R., Prikhozhaev A. I., Polozova M. V., Myznikov K. O. Evaluation of the economic efficiency of the application of ventilation systems. *Economics and entrepreneurship*. 2023;7(256):1084–1087. (In Russ.) EDN: <https://www.elibrary.ru/dddhlu>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Николаевич НАУМЕНКО,

д-р техн. наук, эксперт, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, стр. 1.),
AuthorID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

Прокопий Олегович МУСЕРСКИЙ,

руководитель проектов, Научный центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, стр. 1.),
AuthorID: 1147285, <https://orcid.org/0000-0001-6038-3435>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey N. NAUMENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Expert, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, bldg.1, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 722006,
<https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

Prokopi O. MUSERSKIY,

Project Manager, Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, bldg.1, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1147285,
<https://orcid.org/0000-0001-6038-3435>

ВКЛАД АВТОРОВ

Сергей Николаевич НАУМЕНКО. Обоснование направления исследования, формулировка цели и задач. Написание статьи, формирование выводов и предложений (50 %).

Прокопий Олегович МУСЕРСКИЙ. Обзор основных направлений исследований, сбор и структурирование методики проведения испытаний, расчет зависимостей и обработка результатов (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Sergey N. NAUMENKO. Justification of the direction of the study, goals and objectives formulation. Article writing, forming conclusions and proposals (50 %).

Prokopi O. MUSERSKIY. Review of the main research areas, collection and structuring of test methodology, calculation of dependencies and results processing (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.11.2024, рецензия от первого рецензента получена 27.11.2024, рецензия от второго рецензента получена 13.12.2024, принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 21.11.2024, first review received 27.11.2024, second review received 13.12.2024, accepted for publication 11.02.2025.