

Модернизация систем вентилирования лабораторных помещений

Виктория Дмитриевна Павлидис, Марина Викторовна Чкалова,
Владимир Александрович Шахов, Кирилл Витальевич Скопинцев
Оренбургский государственный аграрный университет, г. Оренбург, Россия
e-mail: shahov-v@yandex.ru

Аннотация. Приводится описание теоретических и экспериментальных исследований вентиляционных систем рекуператорного типа с целью модернизации системы приточно-вытяжной вентиляции лабораторного помещения. Актуальность исследования продиктована необходимостью разрешения базового технического противоречия между снижением энергозатрат и повышением эффективности систем вентиляции. Предложенная авторами система вентиляции рекуператорного типа имеет существенно более низкий коэффициент операторной сложности по сравнению с распространенным аналогом и более высокий структурный компонент инженерной надежности. Все исследования проводились на базе Института управления рисками и комплексной безопасности Оренбургского государственного аграрного университета, а производственные испытания опытного образца вентилятора-рекуператора проходили на базе научно-производственного предприятия «ПневМакс» (г. Оренбург). Внедрение новой системы вентиляции малых лабораторных помещений сельскохозяйственных предприятий будет обеспечивать непрерывность технологических процессов в лабораторном пространстве при повышении эффективности использования производственных ресурсов.

Ключевые слова: система вентиляции; рекуператор; операторная модель; сложность; надежность; аналог; прототип.

Для цитирования: Павлидис В. Д., Чкалова М. В., Шахов В. А., Скопинцев К. В. Модернизация систем вентилирования лабораторных помещений // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 89–94. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i12pp89-94>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Modernization of ventilation systems of laboratory premises

Victoria D. Pavlidis, Marina V. Chkalova, Vladimir A. Shakhov, Kirill V. Skopintsev
Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia
e-mail: shahov-v@yandex.ru.

Abstract. The description of theoretical and experimental studies of ventilation systems of the recuperator type is given in order to modernize the supply and exhaust ventilation system of the laboratory room. The relevance of the study is dictated by the need to resolve the basic technical contradiction between reducing energy consumption and increasing the efficiency of ventilation systems. The recuperator-type ventilation system proposed by the authors has a significantly lower operator complexity factor compared to a common analogue and a higher structural component of engineering reliability. All studies were carried out on the basis of the Institute of Risk Management and Integrated Security of the Orenburg State Agrarian University, and production tests of a prototype fan-recuperator were carried out on the basis of the PnevMax Research and Production Enterprise (Orenburg). The introduction of a new ventilation system for small laboratory premises of agricultural enterprises will ensure the continuity of technological processes in the laboratory space while increasing the efficiency of the use of production resources.

Keywords: ventilation system; recuperator; operator model; complexity; reliability; analogue; prototype.

For citation: Pavlidis V. D., Chkalova M. V., Shakhov V. A., Skopintsev K. V. Modernization of ventilation systems of laboratory premises. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(12):89–94. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i12pp89-94>.

Введение. Комплексный подход к решению проблем продовольственной безопасности России предполагает широкое и активное внедрение биотехнологий в сельскохозяйственное производство. Применение инновационных технологий в различных отраслях сельскохозяйственной деятельности требует создания научно-технологической базы для адаптации новых методик и создания новых продуктов непосредственно на предприятиях агропромышленного комплекса. Реализация таких запросов сельскохозяйственного производства возможна через создание лабораторий различного типа в рамках производственного цикла отдельных предприятий. Проектирование и строительство малых лабораторий сталкивается с проблемой масштабирования систем вентиляции и энергоснабжения.

В данной работе изложены результаты исследований по модернизации системы приточно-вытяжной вентиляции лабораторного помещения. Основные требования к системам вентиляции лабораторного помещения изложены в СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003». Грамотно рассчитанная и организованная инженерная система вентиляции обеспечивает безопасность людей и непрерывность технологических процессов в лабораторном пространстве и выполняет три основные задачи:

- гарантирует интенсивность воздухообмена, достаточную для поддержания высокого качества воздуха;
- создает условия для поддержания постоянства микроклиматических параметров: влажности и температуры воздуха, скорости движения воздушных потоков, концентрации токсичных веществ;
- препятствует развитию чрезвычайных ситуаций: пожаров, взрывов, утечек ядовитых веществ в общую вентиляцию.



Принудительная приточно-вытяжная вентиляция в лабораторном помещении является оптимальным вариантом организации воздухообмена.

В современных условиях сельскохозяйственные предприятия становятся более технологичными, со сложными коммуникациями и инфраструктурой. Расход невозобновляемых видов сырья интенсивно повышается, актуализируя проблему ресурсосбережения. Эффективное использование энергетических и материальных ресурсов является основным трендом в развитии производства. Существенная часть производственных расходов предприятий приходится на содержание систем, регулирующих микроклимат лабораторных помещений. Функционирование систем кондиционирования и приточно-вытяжной вентиляции обеспечивает повышение производительности труда работников за счет улучшения производственных условий. Системы вентиляции могут потреблять до 50-60 % всей электроэнергии здания [1–3]. В связи с этим необходимо искать пути экономии энергии в системах вентиляции и кондиционирования лабораторных помещений.

Разрешение противоречия между необходимостью снижения энергозатрат, ресурсосбережением и повышением эффективности систем вентиляции определяет актуальность нашего исследования.

Целью работы является определение и обоснование основных направлений модернизации системы вентиляции лабораторного помещения, разработка технического решения, позволяющего снизить энергозатраты и способствующего ресурсосбережению.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

определены основные факторы, влияющие на энергозатраты в системе вентиляции;

проведен сравнительный анализ систем вентиляции лабораторных помещений;

разработано техническое решение по модернизации системы вентиляции лабораторного помещения;

построена инженерно-математическая модель вентиляционного устройства;

рассчитаны основные качественные показатели линейных динамических систем, соответствующих моделям аналога и прототипа вентиляционного устройства;

дано техническое описание созданного прототипа.

Методика исследований. В лабораторных помещениях подготовка и подача воздуха для вентилирования осуществляется, в основном, приточно-вытяжными системами. Одним из приемов энергосбережения в системах приточно-вытяжной вентиляции является применение утилизаторов теплоты рекуперативного типа. Удаляемый из помещений воздух используется в летний период для предварительного охлаждения или осушения приточного воздуха, а в холодный – для его нагрева и увлажнения. При этом можно снижать потребление теплоты и холода, а также электроэнергии на поддержание микроклимата в помещениях. Уменьшение энергозатрат на нагревание приточного воздуха в холодный период года в системах приточной вентиляции лабораторных помещений имеет не только экономическое, но и экологическое значение, так как позволяет понизить мощность электрогенерирующих предприятий и затормозить процесс накопления парниковых газов в атмосфере.

Организовать эффективную и экономичную энергосберегающую систему вентиляции небольшой лаборатории – задача, требующая оригинальных и технологичных подходов.

Анализ ряда исследований [1–4] показал, что существенное влияние на энергоэффективность системы вентиляции оказывают конструктивные особенности оборудования, правильная организация воздушных потоков в системе, мощность энергопотребления.

На наш взгляд необходимо разработать техническое решение проблемы модернизации системы вентиляции, учитывающее каждый из этих факторов и их синергетическое влияние на процесс создания микроклимата в помещении. Это позволит повысить эффективность и надежность системы вентиляции, одновременно снижая энергозатраты и улучшая ее экологичность.

Для создания прототипа в рамках предложенного подхода рассмотрим наиболее распространенную на территории Российской Федерации компактную вентиляционную установку рекуперативного типа (УВРК). Данные устройства устанавливаются парно, при этом они работают в противофазе относительно друг друга, которая длится 70 с, после чего происходит смена направления воздушного потока. Влажный комнатный воздух, проходя через холодный рекуператор, вызывает образование конденсата. Для избавления от него периодически (в среднем один раз в 1,5 ч) включением вентилятора на полную мощность активируется режим продува. Рекуператор изготавливается из композитного сплава на специальном оборудовании. УВРК обладает производительностью 50 м³/ч при потребляемой мощности 19 Вт и устанавливается с ограничениями по минимальной толщине стены в 350 мм. На помещение площадью 50 м² необходимо четыре устройства.

Следовательно, основой модернизации должны стать такие конструктивно-технологические изменения имеющегося устройства, которые:

позволят разделить входные и выходные воздушные потоки в единой конструкции с использованием рекуператора роторного типа; снизить затраты на приобретение и установку вентиляционного устройства; уменьшить энергопотребление, сохраняя производительность [5, 6].

Проведенные исследования и анализ рынка комплектующих позволили разработать принципиальную схему вентиляционного устройства рекуперативного типа для использования в лабораторных помещениях (ВСРТ) и определить его основные характеристики (табл. 1).

Принципиальные схемы аналога (УВРК) и прототипа (ВСРТ) представлены на рис. 1, 2.



Сравнение основных характеристик УВРК и опытного образца
(площадь офисного помещения 50 м²)

Характеристики	УВРК (4 устройства)	Прототип (1 устройство)
Тип рекуператора	Канальный	Роторный
Тип вентиляции	Децентрализованный	Децентрализованный
Материал рекуператора	Композитный сплав	Металлическая фольга
Ограничения по минимальной толщине стены, мм	350	–
Производительность, м ³ /ч	200	200–250
Потребляемая мощность, Вт	76	45

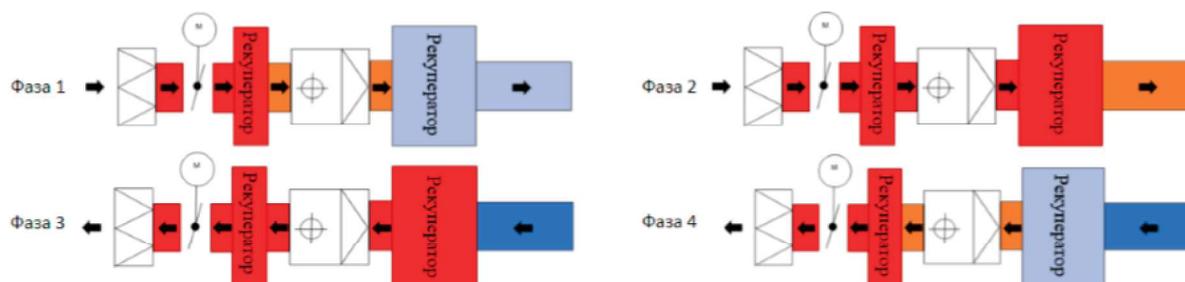


Рис. 1. Принципиальная схема аналога (УВРК-50)

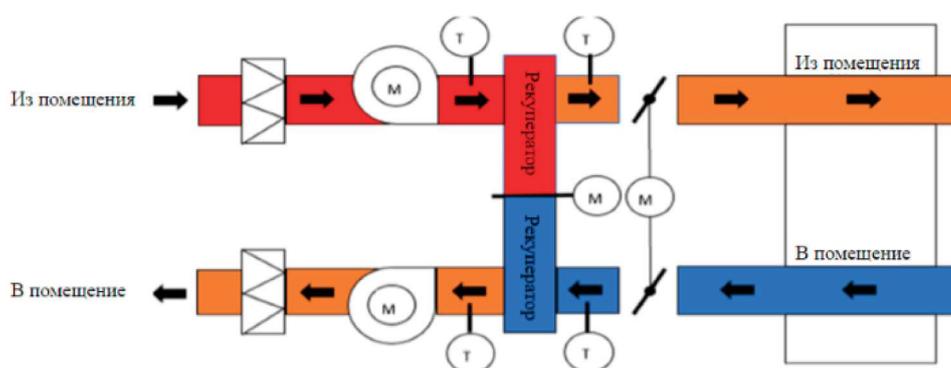


Рис. 2. Принципиальная схема прототипа

Основным доводом в пользу применения в прототипе роторного рекуператора является исключение образования конденсата в нем в любое время года и при любой разнице температур [5–7]. Роторный рекуператор постоянно обдувается двумя потоками воздуха. В ходе этого процесса часть влаги будет возвращаться обратно в помещение, не давая пересушить воздух в холодное время года. Также за счет использования двух тангенциальных вентиляторов вместо одного канального достигается большая производительность в расчете на одну установку.

Результаты исследований. На основе принципиальных схем аналога и прототипа были построены операторные модели соответствующих устройств (рис. 3, 4).

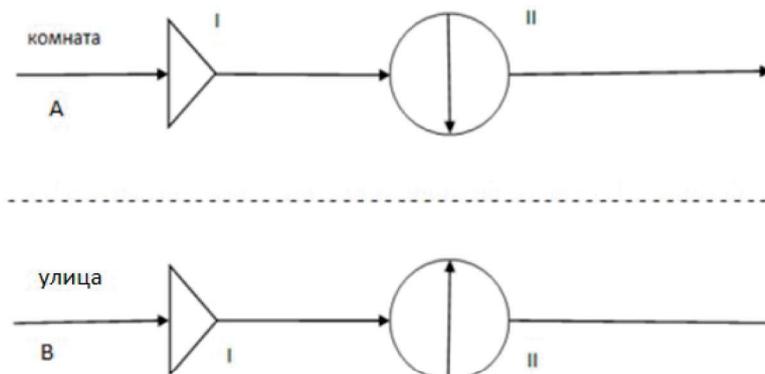


Рис. 3. Операторная модель аналога (УВРК-50):

I – оператор дозирования (канальный вентилятор); *II* – оператор нагрева или охлаждения (канальный рекуператор); *A* – подсистема забора тепловой энергии из комнатного воздуха; *B* – подсистема отдачи тепловой энергии уличному воздуху



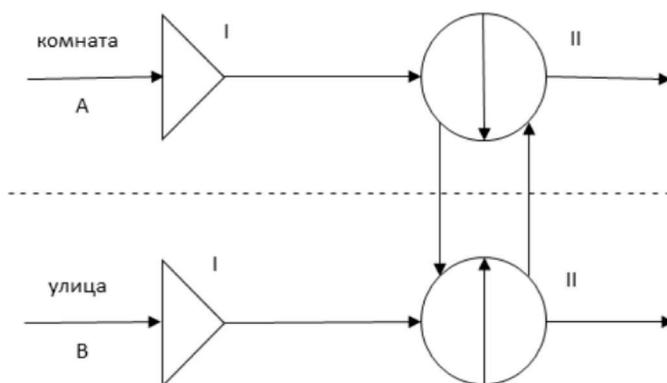


Рис. 4. Операторная модель прототипа (BCPT):
I – оператор дозирования (тангенциальный вентилятор); II – оператор нагрева или охлаждения (роторный рекуператор); A – подсистема забора тепловой энергии из комнатного воздуха; B – подсистема отдачи тепловой энергии уличному воздуху

Надежность любой технической системы, во многом, определяется уровнем ее сложности. Количественная оценка этого качества технической системы может быть реализована различными способами. Авторами разработана методика оценки сложности технической системы через оценку функциональной сложности операторов ее модели. Каждому оператору системы поставим в соответствие количественную характеристику, которую назовем числом степеней его свободы. Число степеней свободы оператора определим как количество характеристик входного сигнала (потока), которые изменяет оператор. Под коэффициентом функциональной сложности оператора будем понимать отношение числа степеней его свободы k к общему количеству расчетных характеристик входного сигнала или потока n :

$$K_c = k/n.$$

Коэффициент сложности K_c системы есть мультипликатор коэффициентов функциональной сложности операторов, соединенных последовательно, и их сумматор - при параллельном соединении. Рассчитаем коэффициент сложности систем по операторной модели аналога и прототипа. В табл. 2 указаны характеристики воздушного потока и отмечены знаком «+» те, которые меняет каждый из операторов системы.

Таблица 2

Изменения характеристик воздушного потока под воздействием операторов систем

Характеристики потока	Оператор			
	I – аналог	II – аналог	I – прототип	II – прототип
Скорость потока	+	+	+	+
Общее давление потока	+	+	+	+
Плотность потока	+	+	+	+
Удельный объем воздушного потока				
Вид течения потока	+	+	+	+
Температура воздуха в потоке		+		+
Влажность воздуха в потоке				+
Итого	4	5	4	6

Таким образом, для аналога имеем:

$$K_c^a = \frac{4}{7} \cdot \frac{5}{7} + \frac{4}{7} \cdot \frac{5}{7} = \frac{40}{49} \approx 0,82.$$

При расчете этого коэффициента для прототипа следует учесть теплообмен противоположно направленных воздушных потоков в роторном рекуператоре. Это физическое взаимодействие приводит к нивелированию изменений некоторых характеристик, порожденных оператором II: давление, плотность, температура, влажность потока.

Следовательно,

$$K_c^p = \frac{4}{7} \cdot \frac{3}{7} + \frac{4}{7} \cdot \frac{3}{7} = \frac{24}{49} \approx 0,49.$$

Полученные результаты свидетельствуют о значительном снижении операторной сложности системы, соответствующей прототипу (BCPT). Показатели сложности, как известно из инженерной практики, коррелируются с показателями надежности технической системы. Операторная надежность является одной из составляющих инженерной надежности технической системы. Будем интерпретировать коэффициент сложности как оценку операторной надежности технической системы $\eta(K_c)$. Тогда оценка операторной надежности аналога составляет: $\eta(K_c^a) = 1 - 0,82 = 0,18$, а оценка операторной надежности прототипа – $\eta(K_c^p) = 1 - 0,49 = 0,51$, что подтверждает существенный рост инженерной надежности прототипа.



Устройство ВСРТ, предлагаемое авторами (рис. 5, 6), работает следующим образом.

Вытяжной вентилятор 1 нагнетает комнатный теплый воздух, который проходит через вращающийся с определенной скоростью роторный рекуператор 3, 4. Рабочая зона 3 рекуператора нагревается от комнатного воздуха. Рекуператор вращается на оси ротора, обеспечивая смену рабочих частей рекуператора 3 и 4. Воздух, отдавший тепловую энергию, выводится по вентиляционному каналу 5 на улицу. Одновременно с этим приточный вентилятор 2 втягивает холодный уличный воздух, который проходит по вентиляционному каналу 6. Далее уличный воздух проходит через рабочую зону 4, и нагревается до комнатной температуры. Вместе с обменом тепла происходит воздухообмен – удаление продуктов дыхания, запахов и приток свежего уличного воздуха.

Основные технические характеристики вентилятора-рекуператора авторской конструкции [8, 9] представлены в табл. 3.

Теоретические изыскания и лабораторные эксперименты проводились на базе Института управления рисками и комплексной безопасности Оренбургского государственного аграрного университета, Инженерно-технические расчеты и производственные испытания опытного образца вентилятора-рекуператора [8, 9] проходили на базе научно-производственного предприятия «ПневМакс» (г. Оренбург).

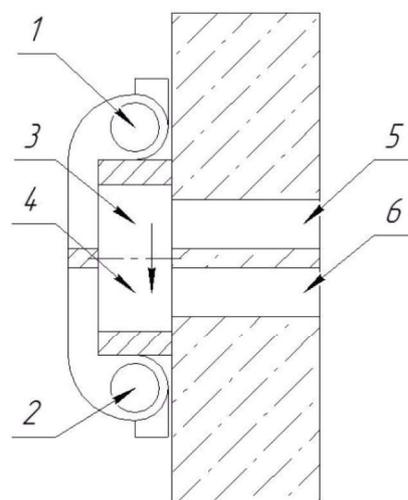


Рис. 5. Принципиальная схема прототипа (ВСРТ)



Рис. 6. Фронтальный вид ВСРТ

Таблица 3

Технические характеристики опытного образца

Параметр		Значение	
Габаритные размеры		500мм × 190мм × 350мм	
Масса		5,8 кг	
Диаметр вентиляционных отверстий		100 мм	
Питание		220В, 50Гц.	
Вентилятор		Ротор	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Электропотребление	22Вт·2 = 44 Вт	Радиус роторного рекуператора	15см
Поток воздуха	200 м³/ч	Масса роторного рекуператора	500 г
Диапазон рабочих температур	-30...40 °С	Материал теплообменника	Гофрированный алюминий

В ходе экспериментальных исследований прототипа для рекуператора с теплоемкостью $Q = 0.904$ кДж/кг (алюминий) были определены следующие рабочие параметры: масса $m = 0,846$ кг, объем воздуха, проходящий через один из контуров рекуператора за 1 мин $v_m = 3,67$ м³. При фиксированной температуре воздуха в помещении (t_1) и фиксированной температуре воздуха на улице (t_2) температура приточного воздушного потока определяется как $t_3 = 18 + 0,2t_2$, а температура отточного воздушного потока $t_4 = 0,2261t_1 + 0,76t_2$. Полагая, что $t_{4,2} = t_3 - t_2$, $t_{1,4} = t_1 - t_4$, получим формулы для определения: количества тепловой энергии в одном кубическом метре воздуха при заданной температуре $E_1 = Qm \cdot t_{1,4}$, теплоемкости рекуператора $E_2 = v_m 1,3t_{3,2}$, скорости вращения рекуператора $\omega = E_2/E_1$.



При $t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_2 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$:

температура приточного воздушного потока:

$$t_3 = 18 + 0,2t_2 = 17 \text{ }^\circ\text{C};$$

температура отточного воздушного потока:

$$t_4 = 0,2261t_1 + 0,76t_2 = 0,27 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{3,2} = t_3 - t_2 = 22 \text{ }^\circ\text{C}, t_{1,4} = t_1 - t_4 = 17,73 \text{ }^\circ\text{C}.$$

количество тепловой энергии в одном кубическом метре воздуха составила:

$$E_1 = 13,56 \text{ кДж};$$

теплоемкость рекуператора:

$$E_2 = 104,96 \text{ кДж};$$

скорость вращения рекуператора:

$$\omega = 7,74 \text{ мин}^{-1}.$$

Заключение. Проведенные исследования позволили авторам определить факторы, существенно влияющие на энергозатраты в системе вентиляции малых лабораторий сельскохозяйственных предприятий; на основе анализа систем вентиляции лабораторных помещений предложить рабочую гипотезу и разработать техническое решение по модернизации вентиляционной системы рекуператорного типа; провести верификацию инженерно-математической модели вентиляционного устройства в лабораторных и производственных условиях, рассчитать качественные показатели и технические характеристики проектируемого технического устройства; создать опытный образец новой системы вентиляции ВСРТ, пригодный для дальнейших технологических испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губернский Ю. Д., Гурина И. В., Шилькрот Е. О. Качество воздуха и энергоэффективность систем вентиляции общественных зданий // Экологические системы. 2011. № 5.
2. Ромашенко А. С., Бойко Е. А., Ильин А. С. Повышение энергетической эффективности систем вентиляции и кондиционирования объектов ЖКХ // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность. 2015. Т. 2.
3. Вишневыский Е.П. Рекуперация тепловой энергии в системах вентиляции и кондиционирования воздуха // С.О.К. 2004. № 11.
4. Теплотехническое моделирование теплообменника системы рекуперации холодоносителя с переменным расходом воздуха / В. В. Шичкин [и др.] // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. № 2(13). С. 46–56.
5. Тарабанов М.Г., Прокофьев П.С. Роторный утилизатор теплоты: результаты экспериментальных исследований // АВОК. 2011. № 7. С. 36-46.
6. Лебедев В.В. Повышение эффективности роторных утилизаторов теплоты в системах кондиционирования воздуха: автореф. ... канд. техн. наук: 05.04.03. СПб., 2009.
7. Godo M., Takatsuka T., Shindo S. Study on Energy Saving Air-Conditioning Compact Desiccant Ventilation Units // International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology. 2010. P. 6.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619716 Российская Федерация. Мобильное приложение для имитационного моделирования потоков в динамических системах: № 2022618319: заявл. 05.05.2022 : опубл. 25.05.2022 / В. Д. Павлидис, В. Е. Медведев, К. В. Скопинцев, Д. Р. Хафизов. – EDN TCXZWH.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660914 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования потоков в динамических системах: № 2022616590 : заявл. 12.04.2022 : опубл. 10.06.2022 / В. Д. Павлидис, М. В. Чкалова, К. В. Скопинцев, А. А. Степанов. EDN XTBOZO.

REFERENCES

1. Gubernsky Yu. D., Gurina I. V., Shilkrot E. O. Air quality and energy efficiency of ventilation systems in public buildings. *Ecological systems*. 2011; 5.
2. Romashchenko A. S., Boyko E. A., Ilyin A. S. Improving the energy efficiency of ventilation and conditioning systems for housing and communal services. *Energy: efficiency, reliability, safety*. 2015; 2.
3. Vishnevsky E.P. Recuperation of thermal energy in ventilation and air conditioning systems. *S.O.K.* 2004; 11.
4. Thermotechnical modeling of the heat exchanger of the coolant recovery system with variable air flow / V. V. Shichkin et al. *Housing and communal infrastructure*. 2020; 2(13): 46-56.
5. Tarabanov M.G., Prokofiev P.S. Rotary heat exchanger: results of experimental studies. *ABOK*. 2011; 7: 36-46.
6. Lebedev V.V. Improving the efficiency of rotary heat exchangers in air conditioning system. SPb., 2009.
7. Godo M., Takatsuka T., Shindo S. Study on Energy Saving Air-Conditioning Compact Desiccant Ventilation Units. *International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology*. 2010: 6.
8. Certificate of state registration of the computer program No. 2022619716 Russian Federation. Mobile application for simulation of flows in dynamic systems: No. 2022618319: Appl. 05/05/2022 : publ. May 25, 2022 / V. D. Pavlidis, V. E. Medvedev, K. V. Skopintsev, D. R. Khafizov. EDN TCXZWH.
9. Certificate of state registration of the computer program No. 2022660914 Russian Federation. The program for simulation of flows in dynamic systems: No. 2022616590 : Appl. 04/12/2022 : publ. 06/10/2022 / V. D. Pavlidis, M. V. Chkalov, K. V. Skopintsev, A. A. Stepanov. EDN XTBOZO.

Статья поступила в редакцию 10.06.2022; одобрена после рецензирования 12.07.2022; принята к публикации 25.07.2022.
The article was submitted 10.06.2022; approved after reviewing 12.07.2022; accepted for publication 25.07.2022.

