

Усовершенствованная рекуператорная установка
с повышенным коэффициентом полезного действия
для использования в механических системах вентиляции

Дмитрий Олегович Хлопицын, Андрей Георгиевич Рымаров
Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Инженерные системы являются неотъемлемой частью всех зданий. Именно они предоставляют комфортное пребывание и обеспечивают жизнедеятельность для человека. Роль энергосберегающих мероприятий, применяемых в строительстве и эксплуатации инженерных систем, очень важна. С помощью данных технологий и их усовершенствования происходит энергосбережение природных ресурсов. Энергоэффективность в технологиях помогает уменьшать затраты на энергетические ресурсы, обеспечивать необходимый уровень технологических процессов в зданиях. Рассмотрена проблема энергосбережения в механических системах вентиляции. Для реализации энергоэффективного использования ресурсов предложена усовершенствованная рекуператорная установка с повышенным коэффициентом полезного действия (КПД). В настоящее время для инженеров должен существовать больший выбор применяемых конструкций рекуператоров с повышенным КПД, которые можно использовать под разные типы объектов и технические условия.

Материалы и методы. Рекуператор предлагается как аналог существующих образцов и относится к области энергоэффективности в системах вентиляции.

Результаты. Предложено повышение КПД по сравнению с аналогами за счет увеличения площади соприкосновения теплоносителей; особой внутренней конструкции, способной к более равномерной теплопередаче; нетиповой схемы расположения рекуператорной установки для избежания обмерзания и оттайки конденсата у теплопередающей поверхности. Применение возможно во многих типах зданий, так как имеется минимальное смешение приточного и вытяжного воздуха. Работа системы вентиляции регулируется автоматикой для получения более комфортного микроклимата в помещении.

Выводы. Новая конструкция приобретает повышенный КПД по сравнению с аналогами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рекуператорная установка, теплообмен, теплопередача, теплоноситель, вентиляция

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хлопицын Д.О., Рымаров А.Г. Усовершенствованная рекуператорная установка с повышенным коэффициентом полезного действия для использования в механических системах вентиляции // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 9. С. 1444–1450. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1444-1450

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Олегович Хлопицын, dkhlopitsyn@mail.ru.

Improved recuperator unit with increased efficiency for use
in mechanical ventilation systems

Dmitrii O. Khlopitsyn, Andrey G. Rymarov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Engineering systems are an integral part of all buildings. It is they who provide a comfortable stay and provide vital activity for a person. The role of energy-saving measures used in the construction and operation of engineering systems is very important. With the help of these technologies and their improvements, energy conservation of natural resources takes place. Energy efficiency in technology helps humanity to reduce the cost of energy resources, but at the same time to ensure the necessary level of technological processes in buildings. This article will show the problem of energy saving in mechanical ventilation systems. To implement energy-efficient use of resources, an improved recuperator unit with an increased efficiency is proposed. Currently, for engineers, there should be a greater choice of used recuperator designs with an increased efficiency, which can be used for different types of objects and technical conditions.

Materials and methods. The recuperator is offered as an analogue of existing samples and relates to the field of energy efficiency in ventilation systems.

Results. An increase in efficiency compared to analogues due to an increase in the area of contact of heat carriers, due to a special internal design capable of more uniform heat transfer, due to a non-standard layout of the recuperator unit to avoid freezing and “defrosting” of condensate at the heat transfer surface. Application in many types of buildings, as there

is minimal mixing of supply and exhaust air. The operation of the ventilation system is regulated by automation, in order to obtain a more comfortable microclimate in the room.

Conclusions. The new design acquires an increased efficiency compared to analogues.

KEYWORDS: recuperator unit, heat exchange, heat transfer, coolant, ventilation

FOR CITATION: Khlopitsyn D.O., Rymarov A.G. Improved recuperator unit with increased efficiency for use in mechanical ventilation systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(9):1444-1450. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1444-1450 (rus.).

Corresponding author: Dmitrii O. Khlopitsyn, dkhlopitsyn@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Энергосберегающие мероприятия в системе механической вентиляции всегда пользовались спросом у инженеров и заказчиков, так как именно они показывают со временем положительные стороны в эксплуатации системы вентиляции. С развитием технологий на рынке энергосбережения в системах вентиляции большой спрос получили рекуператоры. Системы механической вентиляции с использованием рекуператоров массово применяются на объектах, где возрастает необходимость в минимальных затратах энергоресурсов. Рекуператоры — теплообменники, позволяющие передавать тепло от более нагретого к менее нагретому теплоносителю [1–4]. Проектирование и монтаж механической системы вентиляции с использованием воздушных теплообменников выполняют для жилых, общественных и производственных зданий. Рекуператоры подразделяют на следующие виды:

- камерный;
- с промежуточным теплоносителем;
- пластинчатый;
- фреоновый;
- роторный.

При правильном подходе к проектированию можно значительно повысить эффективность рекуператорных установок [5–7]. Модернизация конструкций воздушных теплообменных аппаратов является важной задачей для повышения коэффициента полезного действия (КПД) существующих аналогов. Ведущие компании мира ставят приоритетной задачей повышение энергосбережения с помощью изменения конструкции как самой установки, так и теплопередающей поверхности. Ключевые цели — экономия денежных средств на покупку установки, легкость при эксплуатации и окупаемость со временем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье предложен аналог, созданный на базе пластинчатого и кожухотрубного теплообменников, отличающийся конструкцией от имеющихся на сегодняшний день и нетиповой схемой расположения. В исследовании рассматривается рекуператор, работающий на теплоносителе — воздухе.

Технический результат работы — повышение КПД при помощи:

- отсутствия обмерзания и оттайки теплопередающей поверхности;
- нетиповой схемы расположения;
- вида теплопередающего материала;
- оребрения поверхности;
- увеличения площади теплопередающей поверхности за счет расположения вытяжных воздуховодов с приточными воздуховодами, объединенными в общий короб;
- автоматизации работы системы вентиляции.

Для большей экономии тепла была спроектирована установка, позволяющая добиться большей энергоэффективности в холодный и переходный периоды года. Особенность конструкции в том, что рекуператор играет роль трассы воздуховода и воздухоподделительного устройства одновременно, воздуховоды вытяжной и приточной систем объединены в один прямоугольный корпус. Внутри внешнего короба проходит менее нагретый воздух (приточный воздух), поступающий из нагревателя с температурой не ниже 5 °С, для отсутствия обмерзания теплопередающей поверхности и поддержания высокого КПД установки. Приточный воздух обтекает трубки ромбовидной формы с оребрением, где проходит удаляемый воздух.

Важную роль в интенсивности теплопередачи от более нагретого теплоносителя к менее нагретому (воздух–воздух) играют конструкция рекуператорной установки [8–12], расположение после нагревателя для отсутствия обмерзания и оттайки, теплопередающий материал, оребрение теплопередающей поверхности и обтекание теплопередающего материала теплоносителями. Все составляющие влияют на один из самых важных параметров — критерий Нуссельта. Именно критерий Нуссельта главным образом влияет на теплоотдачу от поверхности теплопередающего материала со стороны приточного и вытяжного воздуха [13–24]. Автоматика контролирует процессы в механической системе вентиляции и может регулировать мощность начального нагрева [25–27].

Движение теплоносителя в рекуператорной установке — смешанный процесс, что позволяет приточному воздуху сделать длиннее путь от точки входа теплоносителя в воздушный теплообменник до выхода из него. Трубки ромбообразной формы приняты для того, чтобы поток приточного воздуха проходил с большим обтеканием, образующимся еще и с помощью ступенчатого расположения. Эта схема дает возможность использовать все плюсы

противоточного, прямоточного и перекрестного движения. Данная рекуператорная установка относится к группе установок непрерывного действия. Все процессы, протекающие в теплообменнике, происходят на протяжении всего периода работы системы вентиляции. Для демонстрации рекуператорной установки представлены принципиальная схема и внутренняя конструкция (рис. 1–5).

Состав установки: 1 — нагреватель; 2 — приточный вентилятор; 3 — вытяжной вентилятор; 4 — датчик температуры; 5 — автоматический щит управления; 6 — приточный воздуховод; 7 — вытяжной воздуховод; 8 — приточный воздух; 9 — вытяжной воздух; 10 — рекуператорная установка; 11 — теплопередающая поверхность; 12 — внешний воздуховод (короб); 13 — приточное воздухо-распределительное устройство; 14 — вытяжная решетка; 15 — короб для стабилизации воздушного потока; 16 — дроссель-клапан; 17 — перегородка.

Рассмотрим алгоритм работы усовершенствованной рекуператорной установки, позволяющей повысить КПД в холодный и переходный периоды года.

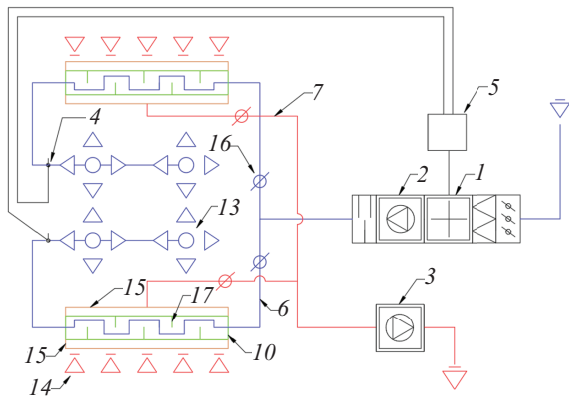


Рис. 1. Принципиальная схема усовершенствованной рекуператорной установки с повышенным КПД для использования в механических системах вентиляции

Fig. 1. Schematic diagram of an improved recuperator unit with an increased efficiency for use in mechanical ventilation systems

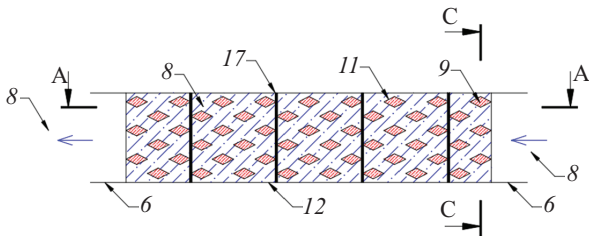


Рис. 2. Продольное сечение усовершенствованной рекуператорной установки с повышенным КПД для использования в механических системах вентиляции

Fig. 2. Longitudinal section of an improved recuperator unit with an increased efficiency for use in mechanical ventilation systems

Приточный воздух нагревается до температуры не ниже 5 °С в нагревателе 1 (для отсутствия обмерзания и оттайки теплопередающей поверхности для поддержания высокого КПД установки) и подается приточным вентилятором 2 по приточному воздуховоду 6, проходит через клапан 16 для регулировки потерь давления и попадает в рекуператорную установку 10, где догревается за счет вытяжного воздуха 9, который является более нагретым. Далее приточный воздух 8, выходя из рекуператорной установки 10, проходит по приточному воздуховоду 6 и доходит до датчика температуры 4, который анализирует необходимую температуру и с помощью автоматики подает сигнал на нагреватель 1, который в свою очередь нагревает или охлаждает

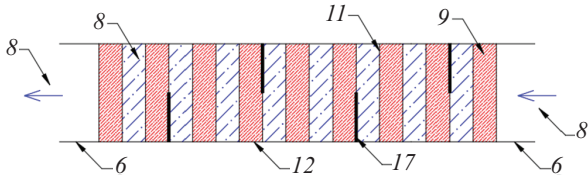


Рис. 3. Продольное сечение А–А усовершенствованной рекуператорной установки с повышенным КПД для использования в механических системах вентиляции

Fig. 3. Longitudinal section A–A of an improved recuperator unit with an increased efficiency for use in mechanical ventilation systems

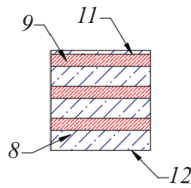


Рис. 4. Поперечное сечение С–С усовершенствованной рекуператорной установки с повышенным КПД для использования в механических системах вентиляции

Fig. 4. Cross section C–C of an improved recuperator unit with an increased efficiency for use in mechanical ventilation systems

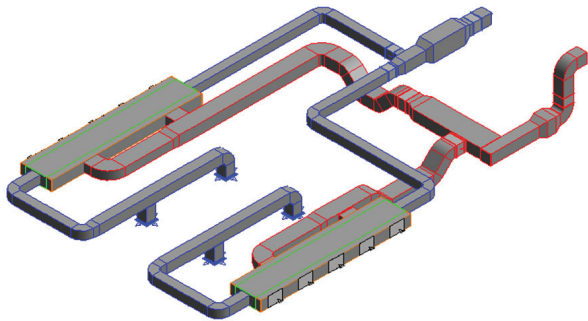


Рис. 5. BIM-модель усовершенствованной рекуператорной установки с повышенным КПД для применения в механических системах вентиляции

Fig. 5. BIM-model of an improved recuperator unit with an increased efficiency for use in mechanical ventilation systems

первую ступень нагрева, в процессе приточный воздух 8 поступает в помещение из приточного воздухораспределительного устройства 13.

Вытяжной воздух 9 забирается вытяжными решетками 14 и затем поступает в короб стабилизации воздушного потока 15 для более равномерного входа в рекуператорную установку 10 и теплопередачи между вытяжным воздухом 9 и приточным воздухом 8. Вытяжной воздух 9 в рекуператоре проходит через трубки, сделанные из материала с высоким коэффициентом теплопроводности ромбообразного строения и расположенные смешено по типу движения потока приточного воздуха 8. Далее вытяжной воздух 9, выходящий из рекуператорной установки 10, поступает в короб стабилизации воздушного потока 15. Из короба вытяжной воздух поступает в вытяжной воздуховод 7, проходит через клапан 16 для регулировки потерь давления и удаляется вытяжным вентилятором 3.

Конденсат, выпадающий при осуществлении теплообмена между вытяжным воздухом 9 и приточным воздухом 8, удаляется в дренажную систему.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отметим положительные стороны рассмотренной установки:

1. Снижение затрат на мощность нагревателя. Нагрев приточного воздуха начинается в нагревателе с температуры наружного воздуха и до значения температуры входа в рекуператорную установку (не ниже 5 °С), догрев осуществляется в рекуператоре за счет переноса тепла от вытяжного к приточному воздуху через теплопередающую поверхность (трубки ромбообразной формы). Выход свежего воздуха в помещение из приточного воздухораспределительного устройства будет с нормируемой температурой, на которую выполнялся расчет системы вентиляции.

2. Снижение эксплуатационных затрат. При использовании рекуператора после нагревателя в системе механической вентиляции отсутствует обмерзание и последующая оттайка теплопередающей поверхности. Данная схема расположения рекуператора в системе вентиляции позволяет обходиться без замены теплопередающего материала или ремонта состава установки, так как на всем протяжении работы в холодный и переходный периоды года средняя температура работы в установке сохраняется плюсовой. Техническому персоналу необходимо делать проверку только на загрязнение, целостность теплопередающего материала возможно проверять один раз в год.

3. Простота конструкции усовершенствованного рекуператора. Конструкция усовершенствованной рекуператорной установки не содержит движущих элементов, теплопередающие трубки располагаются в коробе, что не вызывает трудностей в заводской сборке. Перегородки, установлен-

ные внутри рекуператорной установки, повышают интенсификацию теплопередачи.

4. Эстетическая составляющая. Рекуператор играет роль трассы воздуховода и воздухораспределительного устройства одновременно, что позволяет располагать в нем большую площадь теплопередающей поверхности, скорость теплоносителя (воздуха) не вызывает шума, так как поток движения, близкий к ламинарному.

5. Применение во многих типах зданий. Имеется минимальное смешение приточного и вытяжного воздуха.

6. Применение автоматики для регулирования и поддержания температуры. С помощью датчика температуры и щита управления происходит регулировка мощности нагрева приточного воздуха. Мощность нагрева варьируется в течение дня в зависимости от температуры наружного воздуха и внутреннего воздуха. Автоматика поддерживает необходимую нормируемую температуру свежего воздуха на выходе в помещение из приточного воздухораспределительного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из проектного решения, особая конструкция позволяет в холодный и переходный периоды года экономить тепловую мощность на нагревание приточного воздуха. Обмерзание теплопередающих пластин отсутствует и время их оттайки не сможет снизить КПД рекуператора, так как рекуператор установлен после нагревателя, играя роль доводчика, а поток приточного воздуха в точке входа в рекуператор имеет температуру не менее 5 °С. Автоматика контролирует весь процесс нагрева приточного воздуха в нагревателе для поддержания комфортного микроклимата в помещении. При проектировании данных рекуператоров необходимо учитывать:

- параметры:
 - 1) внутреннего воздуха;
 - 2) наружного воздуха;
 - 3) входа приточного воздуха в усовершенствованную рекуператорную установку (температура воздуха не менее 5 °С);
 - 4) выхода приточного воздуха из усовершенствованной рекуператорной установки;
 - 5) входа удаляемого воздуха в усовершенствованную рекуператорную установку;
 - 6) выхода удаляемого воздуха из усовершенствованной рекуператорной установки;
- расход приточного и вытяжного воздуха;
- площадь теплопередающей поверхности;
- материал и оребрение теплопередающей поверхности в усовершенствованной рекуператорной установке;
- количество поворотов потока приточного воздуха с помощью перегородок (удлинения траек-

тории пути входа приточного воздуха в рекуператорную установку и его выхода из нее).

При эксплуатации данных рекуператорных установок необходимо учитывать:

- регулярную очистку теплопередающей поверхности для поддержания расчетного КПД работы (минимизировать частую очистку теплопередающей поверхности в рекуператоре можно при помощи установки фильтра полной очистки «особо тонкой очистки» в системе механической вентиляции);
- регулярную проверку работы системы автоматики для поддержания температуры приточного воздуха.

Воздушные рекуператоры являются эффективным методом борьбы с затратами на тепловую мощ-

ность нагревателей в системах вентиляции. Воздушный теплообменник дает возможность значительно снизить затраты на подогрев воздуха, а также поддерживать качество воздуха в помещении для комфортного пребывания в нем людей.

Современные технологии в области вентиляции и кондиционирования воздуха ориентированы на энергосбережение и экологичность, что предполагает большее развитие рекуператорных установок, их вариантность конструкций, методов регулировки и контроля выходных параметров. Благодаря таким разработкам удастся минимизировать затраты на энергию и тем самым снизить потребление природных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коновалова Л.С., Загромов Ю.А. Теоретические основы теплотехники. Теплопередача : учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2001. 118 с.
2. Видин Ю.В. Инженерные методы расчета задач теплообмена. М. : Инфра-М., 2018. 166 с.
3. Виноградов С.Н., Таранцев К.В., Виноградов О.С. Выбор и расчет теплообменников : учебное пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2001. 100 с.
4. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С., Пророкова М.В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата : учебное пособие. Иваново : Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2013. 124 с. EDN WBUDLB.
5. Самарин О.Д. Основы обеспечения микроклимата зданий : учебник. М. : АСВ, 2014. 203.
6. Краснов Ю.С., Борисоглебская А.П., Антипов А.В. Системы вентиляции и кондиционирования. Рекомендации по проектированию, испытаниям и наладке. М. : Термокул, 2006.
7. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненароков А.В. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена. М. : Янус-К, 2009. 299 с. EDN QMKSun.
8. Самарин О.Д., Яцына В.А. Исследование зависимости температурной эффективности пластинчатых рекуператоров от типоразмера вентиляционной установки // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2021. № 2 (230). С. 71–73. EDN NDMEZG.
9. Вдовичев А.А. К вопросу определения температурной эффективности пластинчатых перекрестно-точных рекуператоров воздуха // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14. № 5. EDN XYXUEV.
10. Белоногов Н.В. Утилизация теплоты в перекрестно-точных пластинчатых рекуператорах // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2012. № 2 (122). С. 75–83. EDN RHWDYL.
11. Borowski M., Karch M., Kleszcz S., Sala P., Waryan G. An experimental and numerical investigation of the thermal and non-thermal efficiency for counterflow heat exchanger // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 128. P. 04008. DOI: 10.1051/e3sconf/201912804008
12. Kleszcz S., Jaszczur M., Pawela B. An analysis of the periodic counterflow heat exchanger for air-to-air heat recovery ventilators // Energy Reports. 2023. Vol. 9. Pp. 77–85. DOI: 10.1016/j.egy.2023.03.088
13. Golijanek-Jędrzejczyk A., Mrowiec A., Kleszcz S., Hanus R., Zych M., Jaszczur M. A numerical and experimental analysis of multi-hole orifice in turbulent flow // Measurement. 2022. Vol. 193. P. 110910. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.110910
14. Chompookham T., Chingtuaythong W., Chokphoemphun S. Influence of a novel serrated wire coil insert on thermal characteristics and air flow behavior in a tubular heat exchanger // International Journal of Thermal Sciences. 2022. Vol. 171. P. 107184. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107184
15. Lamlerd B., Bubphachot B., Chompookham T. Experimental investigation of heat transfer characteristics of steam generator with circular-ring turbulators // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 41. P. 102549. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102549
16. Белоногов Н.В., Пронин В.А. Оптимизация геометрических параметров перекрестно-точных пластинчатых рекуператоров // Вестник Международной академии холода. 2008. № 1. С. 21–23. EDN JXORYH.
17. Рутковский А.Л., Макоева А.К., Коробкин П.С. Использование рекуператора типа «труба в трубе» для возврата отходящих газов в вельц-печь барабанного типа // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 1 (115). С. 30–33. EDN EJDJJJ.
18. Сафронов К.Л. Аналитический обзор приточно-вытяжных вентиляций с рекуперацией //

Международный студенческий научный вестник. 2018. № 6. С. 100. EDN YRRQKL.

19. Вдовичев А.А. Численное исследование теплопереноса и аэродинамики в перекрестно-точном рекуператоре открытого типа // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14. № 2.

20. Демидочкин В.В., Костуганов А.Б., Черчаев А.А. Определение теплотехнической эффективности пластинчатого теплоутилизатора // Вестник Оренбургского государственного университета. 2018. № 6 (218). С. 123–131. DOI: 10.25198/1814-6457-218-123. EDN HNFKOY.

21. Вдовичев А.А. Особенности численного моделирования пластинчатого перекрестно-точного рекуператора воздуха // Вестник Евразийской науки. 2021. № 5.

22. Карапузова Н.Ю., Фокин В.М. Расчет теплообменных аппаратов : методические указания к курсовому и дипломному проектированию. Волгоград : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2013. 67 с. EDN WABVMN.

23. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче : учебное пособие для вузов. М. : Энергия, 1980. 288 с.

24. Булыгин Ю.А. Теплообменные аппараты в нефтегазовой промышленности : учебное пособие. Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2015. 100 с.

25. Halawa E., van Hoof J. The adaptive approach to thermal comfort : A critical overview // Energy and Buildings. 2012. Vol. 51. Pp. 101–110. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.04.011

26. Власенко О.М., Сорокин А.С., Абдулаев С.Х. Обогрев вентиляции при автоматизации производственных зданий легкой промышленности // Дизайн и технологии. 2015. № 50 (92). С. 70–77. EDN VXL CNT.

27. Пачкин С.Г., Котляров Р.В., Шевцова Т.Г., Иванов П.П., Ли С.Р., Преснова А.С. Разработка автоматизированной системы управления приточно-вытяжной вентиляцией // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 1. С. 80–84. DOI: 10.17513/snt.39013. EDN CYYMBL.

Поступила в редакцию 21 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 23 июня 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Олегович Хлопицын — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1107240, Scopus: 57224204063, ORCID: 0009-0003-4988-3385; dkhlopitsyn@mail.ru;

Андрей Георгиевич Рымаров — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 665928, Scopus: 7801333552, ResearcherID: AFM-6219-2022, ORCID: 0000-0002-1901-1557; rymarov@yandex.ru.

Вклад авторов:

Хлопицын Д.О. — идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи.

Рымаров А.Г. — научное руководство, научное редактирование текста, концепция исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Konovalova L.S., Zagromov Yu.A. *Theoretical foundations of heat engineering. Heat transfer : textbook*. Tomsk, TPU Publ., 2001; 118. (rus.).

2. Vidin Yu.V. *Engineering methods for calculating heat transfer problems*. Moscow, Infra-M Publ., 2018; 166. (rus.).

3. Vinogradov S.N., Tarantsev K.V., Vinogradov O.S. *Selection and calculation of heat exchangers : textbook*. Penza, PGU Publ., 2001; 100. (rus.).

4. Bukhmirov V.V., Rakutina D.V., Solnyshkova Yu.S., Prorokova M.V. *Calculation of heat exchangers: methodological guidelines for course and diploma design : textbook*. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenina, 2013; 124. EDN WBUDLB. (rus.).

5. Samarin O.D. *Fundamentals of ensuring the microclimate of buildings : textbook*. Moscow, ASV, 2014; 203. (rus.).

6. Krasnov Yu.S., Borisoglebskaya A.P., Antipov A.V. *Ventilation and air conditioning systems. Recommendations for design, testing and commissioning*. Moscow, Termokul, 2006. (rus.).

7. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Nenarokov A.V. *Inverse problems in the study of complex heat transfer*. Moscow, Yanus-K Publ., 2009; 299. EDN QMK SUN. (rus.).

8. Samarin O.D., Yatsyna V.A. Research of the dependence of the thermal efficiency of the plate heat exchanger from the ventilation unit size. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2021; 2(230):71-73. EDN NDMEZG. (rus.).

9. Vdovichev A.A. To the question of determining the temperature efficiency of plate cross-flow air recuperators. *Bulletin of the Eurasian Science*. 2022; 14(5). EDN YXXUEV. (rus.).
10. Belonogov N.V. Heat recovery in cross-flow plate recuperators. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2012; 2(122):75-83. EDN RHWYDL. (rus.).
11. Borowski M., Karch M., Kleszcz S., Sala P., Waryan G. An experimental and numerical investigation of the thermal and non-thermal efficiency for counter-flow heat exchanger. *E3S Web of Conferences*. 2019; 128:04008. DOI: 10.1051/e3sconf/201912804008
12. Kleszcz S., Jaszczur M., Pawela B. An analysis of the periodic counterflow heat exchanger for air-to-air heat recovery ventilators. *Energy Reports*. 2023; 9:77-85. DOI: 10.1016/j.egy.2023.03.088
13. Golijanek-Jędrzejczyk A., Mrowiec A., Kleszcz S., Hanus R., Zych M., Jaszczur M. A numerical and experimental analysis of multi-hole orifice in turbulent flow. *Measurement*. 2022; 193:110910. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.110910
14. Chompookham T., Chingtuaythong W., Chokphoemphun S. Influence of a novel serrated wire coil insert on thermal characteristics and air flow behavior in a tubular heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022; 171:107184. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107184
15. Lamlerd B., Bubphachot B., Chompookham T. Experimental investigation of heat transfer characteristics of steam generator with circular-ring turbulators. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023; 41:102549. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102549
16. Belonogov N.V., Pronin V.A. Optimization of geometric parameters of cross-flow plate recuperators. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2008; 1:21-23. EDN JXORYH. (rus.).
17. Rutkivskiy A.L., Makoeva A.K., Korobkin R.S. Research into cathodic processes in the electrolysis of alkaline lead solutions. *Science and Business: Ways of Development*. 2021; 1(115):30-33. EDN EJDJJJ. (rus.).
18. Safronov K.L. Analytical review of supply and exhaust ventilation with recuperation. *International Student Scientific Bulletin*. 2018; 6:100. EDN YRRQKL. (rus.).
19. Vdovichev A.A. Numerical study of heat transfer and aerodynamics in an open-type cross-flow heat exchanger. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(2). (rus.).
20. Demidochkin V.V., Kostuganov A.B., Cherchayev A.A. Determination of heat technical efficiency of laminated heat recover. *Bulletin of the Orenburg State University*. 2018; 6(218):123-131. DOI: 10.25198/1814-6457-218-123. EDN HNFKOY. (rus.).
21. Vdovichev A.A. Features of numerical simulation of a plate cross-precision air recuperator. *The Eurasian Scientific Journal*. 2021; 5. (rus.).
22. Karapuzova N.Yu., Fokin V.M. *Calculation of heat exchangers : guidelines for course and diploma design*. Volgograd, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2013; 67. EDN WABVMN. (rus.).
23. Krasnoshchekov E.A. *Taskbook on heat transfer : textbook manual for universities*. Moscow, Energiya, 1980; 288. (rus.).
24. Bulygin Yu.A. *Heat exchangers in the oil and gas industry: course design : textbook*. Voronezh, Voronezh State Technical University, 2015; 100. (rus.).
25. Halawa E., van Hoof J. The adaptive approach to thermal comfort : A critical overview. *Energy and Buildings*. 2012; 51:101-110. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.04.011
26. Vlasenko O.M., Sorokin A.S., Abdulayev S.Kh. Ventilation heating during automation of industrial buildings of light industry. *Design and technologies*. 2015; 50(92):70-77. EDN VXL CNT. (rus.).
27. Pachkin S.G., Kotlyarov R.V., Shevtsova T.G., Ivanov P.P., Li S.R., Presnova A.S. Development of an automated control system for plenum exhaust ventilation. *Modern High Technologies*. 2022; 1:80-84. DOI: 10.17513/snt.39013. EDN CYMYBL. (rus.).

Received April 21, 2023.

Adopted in revised form on April 26, 2023.

Approved for publication on June 23, 2023.

BIONOTES: **Dmitrii O. Khlopitsyn** — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1107240, Scopus: 57224204063, ORCID: 0009-0003-4988-3385; dkhlopitsyn@mail.ru;

Andrey G. Rymarov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 665928, Scopus: 7801333552, ResearcherID: AFM-6219-2022, ORCID: 0000-0002-1901-1557; rymarov@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Dmitrii O. Khlopitsyn — idea, collection of material, processing of material, writing an article.

Andrey G. Rymarov — scientific guidance, scientific text editing, research concept.

The authors declare that there is no conflict of interest.