

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 69:004.051

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-107-116>

Цифровой подход к управлению жизненным циклом малоэтажного объекта капитального строительства с тепло- и воздухообменом



EDN: WSUZEC

С.В. Федосов¹  , В.Н. Федосеев² , В.А. Воронов² 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

² Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Российская Федерация

 fedosovsv@mgsu.ru

Аннотация

Введение. Актуальность применения воздушных тепловых насосов (ВТН) в условиях умеренно холодного климата России ограничена резким снижением их эффективности при низких температурах наружного воздуха. Цель статьи — представить цифровой подход к управлению жизненным циклом малоэтажных объектов капитального строительства на основе комбинированной теплонасосной системы с оптимизированным тепловоздухообменом.

Материалы и методы. Предложено техническое решение, включающее запатентованную камеру смешения, устанавливаемую в помещении котельной, которая обеспечивает подачу на испаритель ВТН воздушной смеси с расчетным температурным градиентом. Система интегрирована с приточно-вытяжной вентиляцией перекрестного типа (КПД 40–60 %) и управляется цифровым модулем на базе микропроцессора и ШИМ-регулятора. Математическое моделирование потоков выполнено с применением уравнений Бернулли и неразрывности. Для мониторинга и автоматического регулирования использован комплекс датчиков температуры и давления, обеспечивающий адаптивную работу компрессора, вентиляторов и резервного электродогревателя.

Результаты исследования. Экспериментальные данные подтвердили, что совместная работа ВТН с рекуператором и смесительной камерой позволяет поддерживать высокий коэффициент эффективности (COP) системы. Установлено, что порог экономической целесообразности сохраняется при температуре наружного воздуха до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре теплоносителя $+30\text{...}+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разработанный алгоритм цифрового управления оптимизирует соотношение уличного и рециркуляционного воздуха, минимизируя теплопотери и электрические нагрузки.

Обсуждение и заключение. Внедрение предложенной цифровой модульно-функциональной схемы управления обеспечивает рациональный тепловоздухообмен, снижает габариты и стоимость инженерных коммуникаций, а также повышает энергоэффективность малоэтажных зданий. Разработанное решение может быть масштабировано для широкого диапазона климатических условий РФ, способствуя ресурсосбережению и продлению жизненного цикла объектов капитального строительства.

Ключевые слова: управление жизненным циклом; объекты капитального строительства; теплонасосные системы; цифровой двойник; имитационное моделирование

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А. Цифровой подход к управлению жизненным циклом малоэтажного объекта капитального строительства с тепло- и воздухообменом. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(2):107–116. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-107-116>

Digital Approach to Lifecycle Management of a Low-Rise Capital Construction Facility with Heat and Air Exchange

Sergey V. Fedosov¹  , Vadim N. Fedoseev² , Vladimir A. Voronov² 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

² Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

 fedosovsv@mgsu.ru

Abstract

Introduction. The relevance of using applying air-source heat pumps (ASHPs) in Russia's moderately cold climate conditions is restrained by a sharp decline in their efficiency at low outdoor air temperatures. The aim of this study is to present a digital approach to lifecycle management of low-rise capital construction facilities based on a combined heat pump system with optimized heat and air exchange.

Materials and Methods. A technical solution is set forth incorporating a patented mixing chamber installed in the boiler room to supply an air mixture with a calculated temperature gradient to the ASHP evaporator. The system is integrated with a cross-stream supply and exhaust ventilation (efficiency of 40–60%) and controlled by a digital module based on a microprocessor and PWM regulator. Mathematical modeling of streams was performed using the Bernoulli and continuity equations. For monitoring and automatic control, a set of temperature and pressure sensors was employed to ensure adaptive operation of the compressor, fans, and backup electric boiler.

Research Results. Experimental data have confirmed that the joint operation of the ASHPs with a heat recuperator and mixing chamber allows maintaining a high coefficient of performance (COP) of the system. It was found that the threshold of economic feasibility remains at an outdoor air temperatures of down to -15°C and heat carrier temperatures of $+30\dots+45^{\circ}\text{C}$. The developed digital control algorithm optimizes the ratio of outdoor to recirculating air minimizing heat losses and electrical loads.

Discussion and Conclusion. Implementation of the suggested digital modular and functional control scheme ensures rational heat and air exchange, reduces the size and cost of engineering utilities, and enhances the energy efficiency of low-rise buildings. The developed solution can be scaled for a broad range of climatic conditions nationwide contributing to resource conservation and extension of the lifecycle of capital construction facilities.

Keywords: lifecycle management; capital construction facilities; heat pump systems; digital twin; simulation modeling

Acknowledgments. The authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments making it possible to improve its quality.

For citation. Fedosov SV, Fedoseev VN, Voronov VA Digital Approach to Life Cycle Management of a Low-rise Capital Construction Facility with Heat and Air Exchange. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):107–116. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-107-116>

Введение. За последние годы в десятки раз возрос процент спроса на рынке воздушно-тепловых насосов (ВТН) в Европейских и Скандинавских странах, которые можно назвать умеренно холодными. В официальном рейтинге относительно холодных стран России принадлежит первое место. Поэтому актуальным остаётся вопрос о возможном и эффективном применении воздушных тепловых насосов в климатических условиях большей части РФ [1].

Необходимо отметить, что вопросами жизненного цикла объектов капитального строительства занимались известные ученые России [2–7] и Запада [8–14].

В современных условиях, продолжая традиции ресурсоэнергосбережения, актуальным становится разработка и практические решения применения ВТН на основе цифрового компьютерного управления.

Материалы и методы. Отличительной чертой применения ВТН является то, что в качестве источника низкопотенциального тепла используют окружающий воздух. В случае установки такого устройства на улице его использование становится слабо эффективным, особенно при низкой температуре наружного воздуха. Авторы предложили применить устройство — камеру смешения, встроенную в котельную [15], для подачи напора воздушной смеси на теплообменник — испаритель ВТН расчетного градиента температур (рис. 1).

Следует отметить, что работа камеры смешения ВТН является важным звеном для утилизированного смешения воздуха в испарителе.

Само устройство смешения воздушных потоков содержит входной патрубок воздуховода, патрубок для подачи дополнительного потока, участок смешенного потока. Патрубок для подачи дополнительного потока 2 расположен под углом в пределах $0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$ к вертикали (рис. 1).

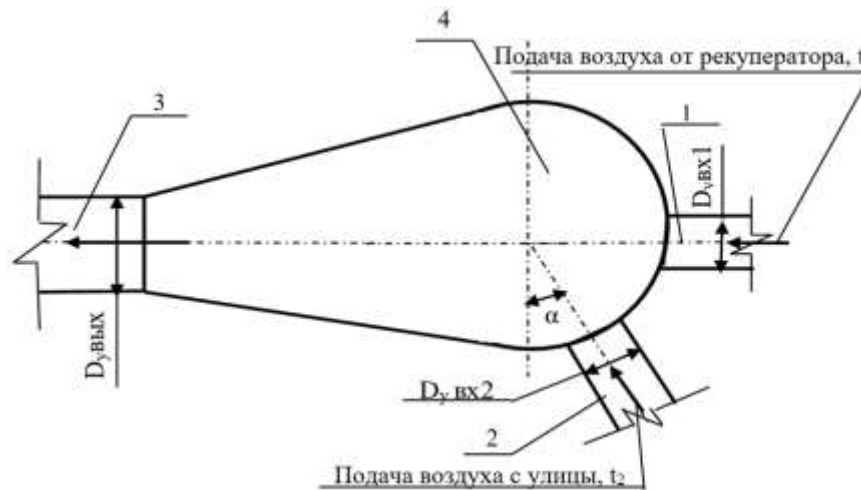


Рис. 1. Средство для смешения газовых потоков

Входной патрубок воздуховода соединен с камерой, выполненной в форме капсулы в виде полусферы, соединенной с большим основанием усеченного конуса. Диаметры входного патрубка воздуховода и патрубка для подачи дополнительного воздушного потока равны, каждый из которых относится к диаметру выходного патрубка воздуховода, который направлен на испаритель ВТН ($d_{вх1} = d_{вх2} = 0,7d_{вых}$).

Такая технология организации воздухопемешения позволяет повысить интенсивность равновесного перемешивания, тем самым улучшая условия теплообмена. Наибольшая интенсивность перемешивания смешенного потока происходит при попадании в зону усеченного конуса и камеры, а при попадании в цилиндрическую часть выходного патрубка воздуховода 3 гомогенизированным потоком совершается переход в ламинарное течение. Скорость гомогенизированного потока перед выходом в цилиндрическую часть выходного патрубка воздуховода 3 повышается до исходной скорости основного потока воздуховода 1, равной скорости потока до входа в полусферу 4 по уравнению Бернулли:

$$\frac{pv^2}{2} + pgh + p = const,$$

где $\frac{pv^2}{2}$ — динамическое давление; pgh — гидростатическое давление; p — статическое давление.

Рассматривая сечение входного патрубка воздуховода 1, патрубка для подачи дополнительного потока 2 и выходного патрубка воздуховода 3 с применением уравнения Бернулли, запишем:

$$\begin{aligned} \left(\frac{pv_{вх1}^2}{2} + p_{вх1}gh_{вх1} + p_{вх1}\right) + \left(\frac{pv_{вх2}^2}{2} + p_{вх2}gh_{вх2} + p_{вх2}\right) = \\ = \frac{pv_{вых}^2}{2} + p_{вых}gh_{вых} + p_{вых}. \end{aligned}$$

Так как давление $p_{вх1}$, $p_{вх2}$ и $p_{вых}$ на уровнях сечений входного патрубка воздуховода 1, патрубка для подачи дополнительного потока 2 и выходного патрубка воздуховода 3 равны атмосферному, т. е. $p_{вх1} = p_{вх2} = p_{вых}$, то уравнение будет иметь вид:

$$\left(\frac{pv_{вх1}^2}{2} + p_{вх1}gh_{вх1}\right) + \left(\frac{pv_{вх2}^2}{2} + p_{вх2}gh_{вх2}\right) = \frac{pv_{вых}^2}{2} + p_{вых}gh_{вых}.$$

Из уравнения неразрывности:

$$\frac{v_{вх}}{v_{вых}} = \frac{S_{вх1} + S_{вх2}}{S_{вых}},$$

где $S_{вх1}$, $S_{вх2}$, $S_{вых}$ — площади поперечных сечений, а $v_{вх} = v_{вых}$.

Тогда $S_{вх1} + S_{вх2} = S_{вых}$. Выразив диаметры $\frac{\pi d_{вх1}^2 + \pi d_{вх2}^2}{4} = \frac{\pi d_{вых}^2}{4}$, получим:

$$d_{вх1}^2 + d_{вх2}^2 = d_{вых}^2.$$

По заданным условиям $d_{вх1}$ и $d_{вх2}$ равны между собой, в качестве примера обозначим: $d_{вх1} = d_{вх2} = 0,2$ м.

Тогда:

$$d_{вых} = \sqrt{d_{вх1}^2 + d_{вх2}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,2^2} = 0,28 \text{ м.}$$

Получим соотношение $\frac{d_{вх}}{d_{вых}} = \frac{0,2}{0,28} = 0,7$.

Тогда:

$$d_{вх1} = d_{вх2} = 0,7d_{вых}$$

Предложенное средство позволяет повысить равновесную интенсивность перемешивания, улучшая условия теплообмена.

В исследованиях процесса воздухообмена авторами разработана комбинированная теплонасосная система теплоснабжения, включающая смесительную камеру, схему воздухообмена с элементом рекуперации и дополнительным ТЭНом, управляемым электронно-импульсным регулятором (ШИМ-регулятор) (рис. 2).

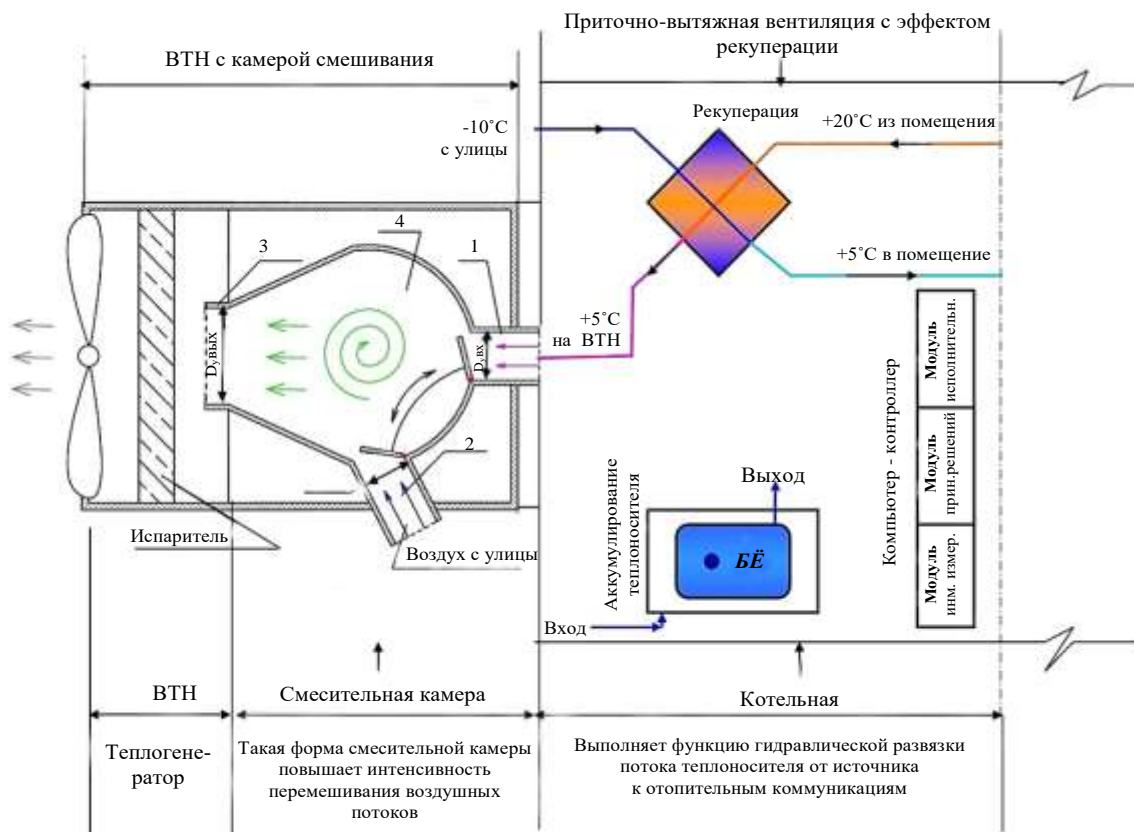


Рис. 2. Комбинированная теплонасосная система теплоснабжения со смесительной камерой, схемой воздухообмена с элементами рекуперации

Режим работы ВТН в условиях умеренно холодного климата в этом случае остается длительное время с достаточно высоким коэффициентом эффективности (COP), получая сигнал от цифровой модели управления теплообменом данной системы теплоснабжения.

Рассматривая такую специфику режима воздухообмена ВТН с элементом рекуперации, определяем функциональные возможности системы теплообмена, работающей через котельную и воздуховоды помещения. Существующая традиционная естественная вытяжная вентиляция, устанавливаемая сегодня в частных домах, квартирах, современных строениях не эффективна, так как при установке герметичных пластиковых стеклопакетов и использовании высокотеплоизоляционных материалов приток воздуха сильно сокращается, в результате чего вытяжная система работает неэффективно.

Результаты исследования. В основе данной работы предлагается использовать приточно-вытяжную вентиляционную систему, в которой заложен принцип рекуперации, то есть процесс, при котором из отработанного воздуха возвращается часть тепла.

Покидая помещение, тёплый воздух частично нагревает встречный холодный поток в теплообменной системе и согласно конфигурации выходит как отработанный по направляющим воздуховода в смесительную камеру на испаритель и далее — через ВТН на улицу, а в помещение попадает частично уже нагретый рекуперационный воздух.

В таких условиях, исходя из основной цели создания энергоэффективного отопления, получаем систему воздухообмена экономически выгодную для теплогенератора ВТН.

То есть, как пример, подбирая рекуператор с КПД $\eta = 50\%$, получаем температуру смешенного потока воздуха, подаваемого на испаритель (рис. 3).

Для практического расчета эффективной температуры подаваемого смешанного воздуха на испаритель теплого насоса применяем инженерный метод расчета, основанный на влиянии процентного соотношения температур по формуле «улица–помещение». Воспользуемся решением для частного случая из уравнения сохранения

теплового баланса для определения температуры относительно теплого потока воздуха, удаляемого из помещения и подаваемого на испаритель ВТН (рис. 3).

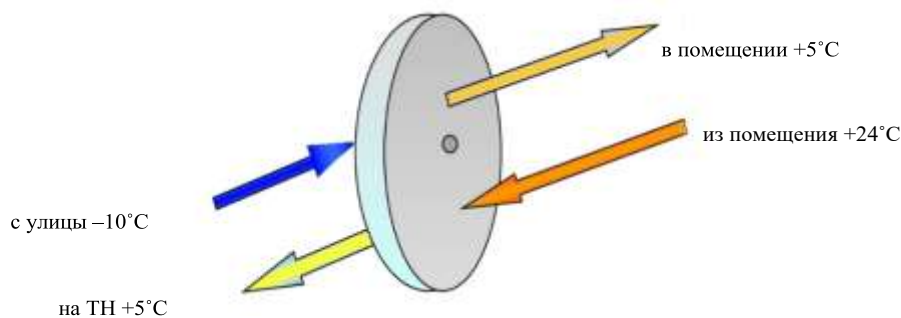


Рис. 3. Изменение величины температуры воздушных потоков в воздуховодах с рекуперацией

Посылая информацию в модуль управления работой смесительной камеры, микропроцессор программно обеспечивает соответствующее текущее решение.

$$\frac{\eta \cdot t_1 + \eta \cdot t_2}{100} = \frac{50 \cdot 24^\circ\text{C} + 50 \cdot (-10^\circ\text{C})}{100} = \frac{(1200 - 500)^\circ\text{C}}{100} = 7^\circ\text{C}$$

где $t_1 = 24^\circ\text{C}$ — температура в помещении, $t_2 = -10^\circ\text{C}$ — температура наружного воздуха.

В Финляндии, например, до приема в эксплуатацию воздуховода с рекуперацией после испытаний оперируют годовым коэффициентом регенерации, который сохраняется для г. Хельсинки и Лапландии.

При совместной работе ВТН и приточно-вытяжной вентиляции со встроенными элементами рекуперации технические параметры системы должны соответствовать:

1. Диаметр подключаемого воздуховода, применяемого для наших условий — 125 мм.
2. Количество подключаемых воздуховодов с ВТН — 4.
3. Эффективность рекуперации тепла (η) от 40 % до 60 %.
4. Тип рекуперации — перекрёстного типа.
5. Материал пластины рекуперации — полимеризированная целлюлоза.

Конструктивно рекуператор располагается в замкнутом помещении теплового узла (котельной) с привязкой с одной стороны воздуховодами к ВТН на испаритель, с другой — обеспечивает через воздуховоды помещение слегка нагретым свежим воздухом (рис. 4).

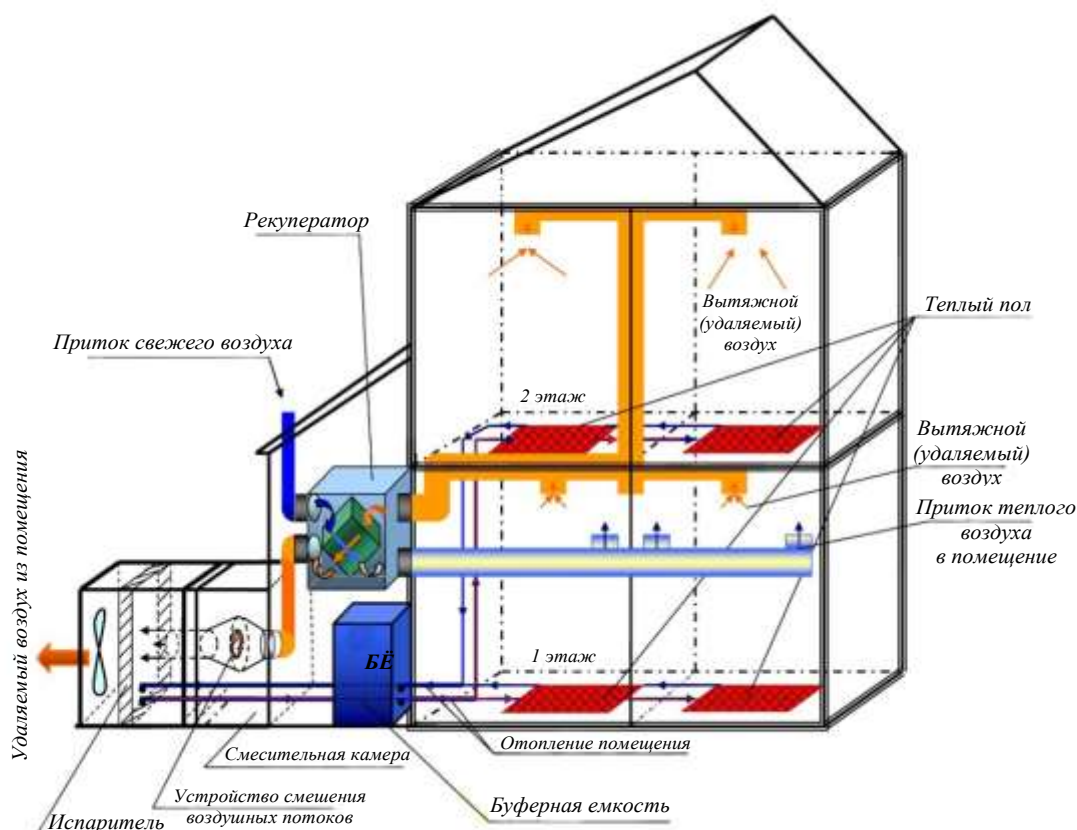


Рис. 4. Эффективная система воздухообмена ВТН

Технология использования такой конфигурации воздуховодов с рекуперацией позволяет обеспечить эффективный рост тепловой мощности ВТН в режиме отопления помещений с умеренно холодным климатом.

Согласно проведенных испытаний, на графике (рис. 5) представлено, насколько эффективнее работает рециркуляционный тепловой насос с элементом рекуперации и встроенной смесительной камерой. «Порог» экономии (убытков) не наступает до температуры воздуха на улице $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре теплоносителя (вода) от $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

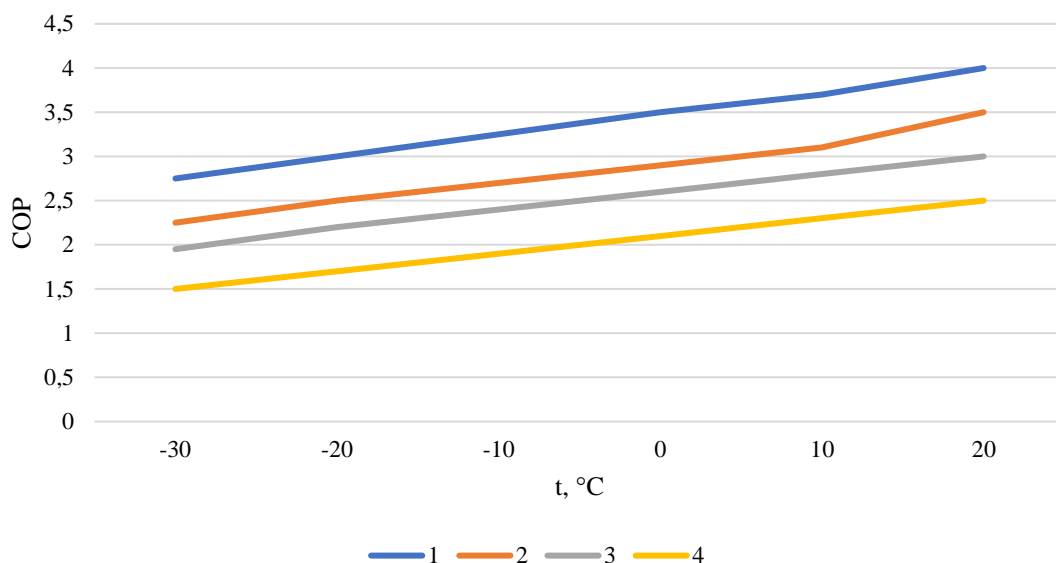


Рис. 5. График результата работы теплообменной теплонасосной системы экспериментального объекта при наружных температурах: 1 — $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $35\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 — $45\text{ }^{\circ}\text{C}$

Буферная накопительная емкость в такой комбинированной отопительной системе выполняет функцию гидравлической развязки объемных потоков источника тепла и отопления, выравнивает момент перепада включения/выключения электрической энергии, компенсируя теплопроизводительность генератора тепла и потребителя тепла, и в то же время выполняет частичное перекрытие тарифных периодов электроэнергии.

В реальных условиях эксперимента (рис. 6) проводились длительные объёмные исследования по обработке данного технологического процесса в цифровом формате. Полученные в результате исследования данные позволили разработать экспериментальное схемное решение (алгоритм) для широкого диапазона различных климатических условий.



Рис. 6. Камера смешения воздуха [15] и ВТН, установленные в малоэтажном жилом здании в Ивановской области

Предлагается разработка цифровой технологической модели управления теплообменом через воздушный тепловой насос для малоэтажных и коттеджных строений (рис. 7). Данную схему поясним таблицей 1.

Таблица 1

Описание датчиков управления

Датчик 1 — D/t_1	Установлен в буферной ёмкости. Сигнал поступает в модуль управления ТН (МУТН) при изменении граничных значений установленной температуры и выходной тепловой мощности ВТН. ВТН включается или выключается.
Датчик 2 — D/t_2	Установлен на испарителе. Сигнал поступает в МУТН при изменении установленных значений параметров. Вентилятор, обдувающий испаритель, согласно параметрам изменяет скорость вращения.
P_1, P_2, P_3	Датчики защиты компрессора. В нормальном рабочем состоянии контакты замкнуты. При превышении или понижении заданных параметров контакты датчиков размыкаются, что приводит к остановке компрессора.
Датчик 2 — D/t_3	Установлен на улице и даёт сигнал состояния температуры на модуль ШИМ-регулятора электродкотла. Модуль ШИМ-регулятор имеет свою программу — настройку управления электродкотлом.
Датчик 2 — D/t_4	Установлен в объёмной смесительной камере и даёт сигнал на модуль управления работой смесительной камеры. Программная настройка, которая защита на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ путем реакции на изменение температуры внутри смесительной камеры. Назначение механизма заслонок — реакция на изменение процентного соотношения поступающего воздуха с улицы и из помещения, обеспечивая получение нужной температуры на испарителе.

Силовые модули обеспечивают необходимую электрическую мощность нагрузок. К нагрузкам относятся: компрессор ТН, вентилятор испарителя, соленоид оттайки, циркуляционный насос, ТЭНы электродкотла, механизм привода заслонок. Силовой модуль питания (МП) обеспечивает работу всей схемы.

Цифровая технологическая модель управления теплообменом через воздушный тепловой насос в малоэтажном строении

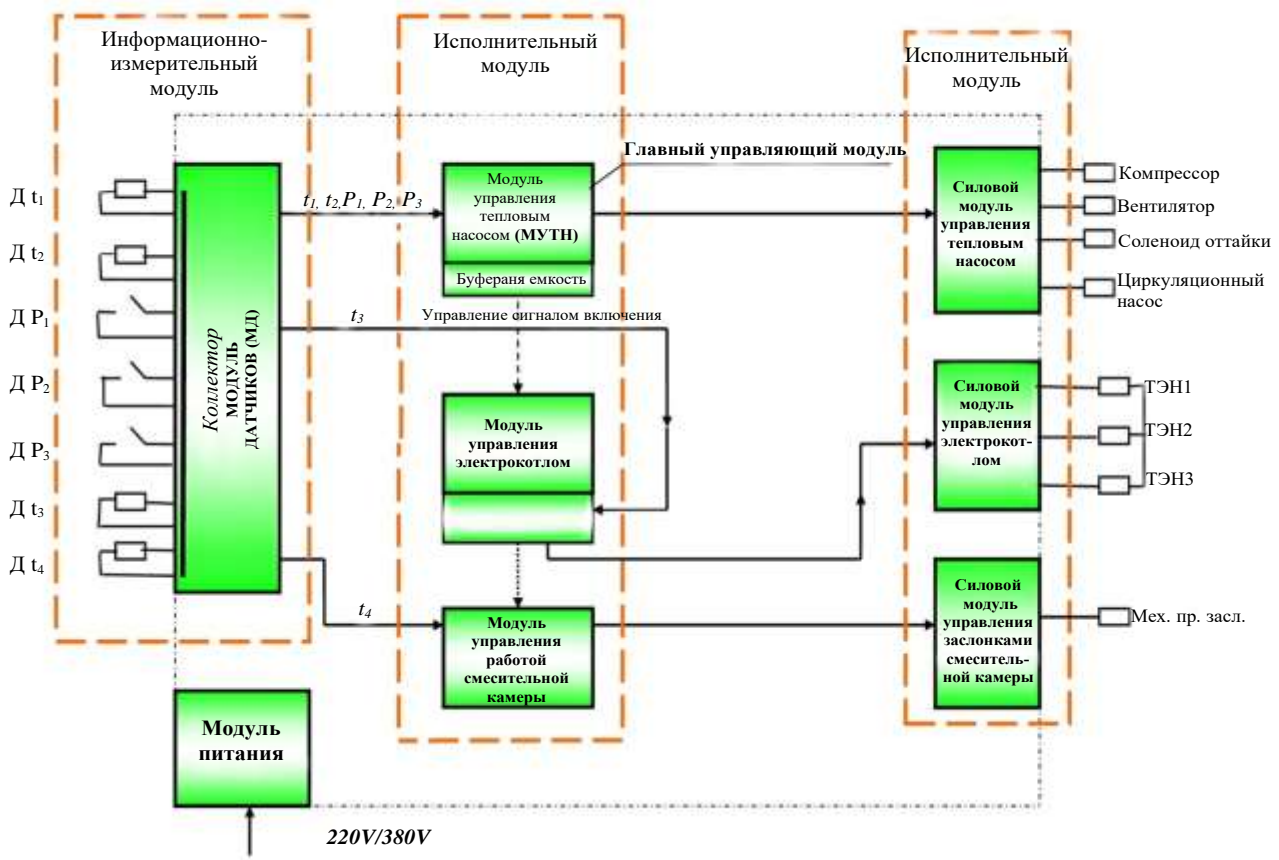


Рис. 7. Цифровой комбинированный модуль управления ВТН (компьютер-контроллер)

Обсуждение и заключение. Используя информационно-цифровые решения, открываются широкие функциональные возможности технологического контроля и управления температурно-влажностным состоянием в помещении строения, температурным градиентом на улице совместно с коллекторным модулем датчиков $Dt_1 - Dt_4$. Цифровой модуль распознавания параметров данного технологического процесса ВТН позволяет обеспечить регулирование попеременного расхода теплого и холодного воздуха, реализуя этот процесс через компьютер-контроллер на исполнительные механизмы системы воздухообмена. Такая цифровизация позволяет снизить излишнюю тепловую и электрическую нагрузку, а также минимизировать объем, площадь котельной и коммуникации воздухообмена. В результате принятых решений снижается стоимость и габариты помещения.

Предлагая цифровую модульно-функционально-структурную схему теплогенерации из окружающей среды, в нашем случае опираясь на энергоэффективность схемного решения с электродкотлом, буферной емкостью и запатентованной смесительной камерой [15], мы добиваемся рационально-управляемого тепловоздухообмена комбинированной теплонасосной системы.

Список литературы/References

1. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А. Функционально-структурный анализ фреонового контура воздушного теплового насоса. *Строительные материалы*. 2025;12:65–72. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-842-12-65-72>
Fedosov SV, Fedoseev VN, Voronov VA Functional and Structural Analysis of the Freon Circuit of an Air Heat Pump. *Construction Materials*. 2025;12:65–72. (In Russ.) <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-842-12-65-72>
2. Сколубович Ю.Л., Анпилов С.М., Добровольский Д.А., Ерофеев В.Т., Леонович С.Н., Маилян Л.Р. и др. Способы продления жизненного цикла зданий с деревянными перекрытиями. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024;789:88–103. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103>
Skolubovich YuL, Anpilov SM, Dobrovolsky DA, Erofeev VT, Leonovich SN, Mailyan LR, Rimshin VI, Sorochaykin AN Ways to Extend the Life Cycle of Buildings with Wooden Floors. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024;789:88–103. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103>
3. Римшин В.И., Кецо Е.С., Есипов С.М., Меркулов С.И. Определение факторов, влияющих на жизненный цикл здания торгового назначения. *Вестник евразийской науки*. 2023;15(6):56SAVN623. URL: <https://esj.today/PDF/56SAVN623.pdf> (дата обращения: 17.05.2026)
Rimshin VI, Ketso ES, Esipov SM, Merkulov SI Factors Determination Influencing the Commercial Building Life Cycle. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(6):56SAVN623. (In Russ.) URL: <https://esj.today/PDF/56SAVN623.pdf> (accessed: 17.05.2026)
4. Лapidус А.А., Красновский Б.М., Муртазаев С.А.Ю., Алиев С.А. Методология организации строительства комплексного развития территорий для обеспечения ресурсной и логистической координации. *Строительное производство*. 2025;1:3–7. http://doi.org/10.54950/26585340_2025_1_3
Lapidus AA, Krasnovsky BM, Murtazaev SAYu, Aliev SA Methodology for Organizing Construction of Comprehensive Territorial Development to Ensure Resource and Logistical Coordination. *Construction Production*. 2025;1:3–7. (In Russ.) http://doi.org/10.54950/26585340_2025_1_3
5. Теличенко В.И., Лapidус А.А., Слесарев М.Ю., Али М.М. Методы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с учетом влияния экологических и других видов рисков. *Строительство: наука и образование*. 2024;14(2):166–177. <http://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.2.166-177>
Telichenko VI, Lapidus AA, Slesarev MYu, Ali MM Methods for Managing the Life Cycle of Capital Construction Objects Considering the Impact of Environmental and Other Types of Risks. *Construction: Science and Education*. 2024;14(2):166–177. (In Russ.) <http://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.2.166-177>
6. Маилян Л.Р., Шилов П.А. Технология изготовления фибробетона с агрегированным ориентированным фибровым армированием и исследование его характеристик. *Эксперт: теория и практика*. 2023;2:53–59. http://doi.org/10.51608/26867818_2023_2_53
7. Mailyan LR, Shilov PA Technology of Making Fiber Concrete with Aggregated Oriented Fiber Reinforcement and the Analysis of its Characteristics. *Expert: Theory and Practice*. 2023;(2):53–59. (In Russ.) http://doi.org/10.51608/26867818_2023_2_53
8. Манжилевская С.Е., Евтушенко А.И., Маилян Д.Р. Применение зеленых крыш в точечном строительстве для повышения экологической безопасности городских территорий. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;2:136–145. <http://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-136-145>
Manzilevskaya SE, Evtushenko AI, Mailyan DR Green Roofs in Infill Development to Improve the Environmental Safety of Urban Areas. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;(2):136–145. (In Russ.) <http://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-136-145>

9. Dai B, Liu C, Liu S, Dabiao W, Wang Q, Zou T et al. Life Cycle Techno-Enviro-Economic Assessment of Dual-Temperature Evaporation Transcritical CO₂ High-Temperature Heat Pump Systems for Industrial Waste Heat Recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2023;219:119570. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119570>

10. Wang B, Geng L, Dang P, Zhang L Developing a Framework for Dynamic Organizational Resilience Analysis in Prefabricated Construction Projects: A Project Life Cycle Perspective. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022;148(10):04022111. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002381](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002381)

11. Waqar A, Othman I, Hayat S, Radu D, Khan M, Galatanu T et al. Building Information Modeling-Empowering Construction Projects with End-to-End Life Cycle Management. *Buildings*. 2023;13(8):2041. <http://doi.org/10.3390/buildings13082041>

12. Gamage I, Senaratne S, Perera S, Xiaohua J Implementing Circular Economy throughout the Construction Project Life Cycle: A Review on Potential Practices and Relationships. *Buildings*. 2024;14(3):653. <http://doi.org/10.3390/buildings14030653>

13. Homthong S, Mounngnoi W, Charoenngam C Whole Life Critical Factors Influencing Construction Project Performance for Different Objectives: Evidence from Thailand. *Buildings*. 2024;14(4):999. <http://doi.org/10.3390/buildings14040999>

14. Famiglietti J, Acconito L, Arpagaus C, Toppi T Environmental Life Cycle Assessment of Industrial High-Temperature to Residential Small-Size Heat Pumps: A Critical Review. *Energy Conversion and Management: X*. 2025;26:100947. <http://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100947>

15. Zhang S, Liu S, Shen Y, Shukla A, Mazhar A, Chen T Critical Review of Solar-Assisted Air Source Heat Pump in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;193:114291. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114291>

16. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Емелин В.А., Воронов В.А., Свиридов И.А. Смесительная камера. Патент РФ, № 2024109295. 2024.

Fedosov SV, Fedoseev VN, Emelin VA, Voronov VA, Sviridov IA *Mixing Chamber*. Patent RF, No. 2024109295. 2024.

Об авторах:

Федосов Сергей Викторович, доктор технических наук, академик РААСН, профессор кафедры технологий и организации строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, Москва, Ярославское шоссе, 26), [ScopusID](#), [ORCID](#), fedosovsv@mgsu.ru

Федосеев Вадим Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры организации производства и городского хозяйства Ивановского государственного политехнического университета (153000, Российская Федерация, Иваново, Шереметевский проспект, 21), [ScopusID](#), [ORCID](#), 4932421318@mail.ru

Воронов Владимир Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры организации производства и городского хозяйства Ивановского государственного политехнического университета (153000, Российская Федерация, Иваново, Шереметевский проспект, 21), [ScopusID](#), [ORCID](#), amenamiiii@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

С.В. Федосов: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

В.Н. Федосеев: формирование основной концепции, доработка текста, корректировка выводов.

В.А. Воронов: проведение расчетов, анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Sergey V. Fedosov, D.Sc. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavl Highway, Moscow, 129337 Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), fedosovsv@mgsu.ru

Vadim N. Fedoseev, D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Industrial Management and Urban Management of Ivanovo State Polytechnic University (21 Sheremetyevo Avenue, Ivanovo, 153000, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), 4932421318@mail.ru

Vladimir A. Voronov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Management and Urban Management of Ivanovo State Polytechnic University (21 Sheremetyevo Avenue, Ivanovo, 153000, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), amenamiiii@gmail.com

Claimed contributorship:

SV Fedosov: scientific supervision, formation of the basic concept, aims of the study.

VN Fedoseev: formation of the basic concept, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

VA Voronov: carrying out the calculations, analysis of the research results, preparation of the manuscript, formation of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 17.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 31.05.2026

Принята к публикации / Accepted 14.06.2026