

Анализ перспектив развития термометров для применения в компактных ПВУ с роторным рекуператором

Рецензия эксперта на статью получена
10.06.2024 [The expert review of the article
was received on June 10, 2024]

1. Наиболее распространённые схемы теплоснабжения зданий офисных назначений

Система теплоснабжения здания офисного назначения имеет несколько выделенных подсистем. Например, подсистема горячего водоснабжения (ГВС) предназначена для удовлетворения спроса потребителей в горячей воде. Подсистемы отопления и вентиляции предназначены в том числе для создания комфортного микроклимата в здании. В зависимости от архитектурных особенностей объекта доли теплотребления, затрачиваемые на нужды систем отопления и вентиляции, могут быть различными.

В случае применения в наружных стенах кирпичных или монолитных материалов, а также панелей ЖБИ с точки зрения технико-экономической целесообразности имеет смысл устанавливать настенные радиаторы, обеспечивающие от 50 до 90 % тепловых притоков. При применении панорамного остекления навешивание радиаторов на стены становится невозможным. В таких случаях используются встраиваемые в пол конвекторы с принудительной конвекцией. Ввиду ограниченности площади теплообмена внутренних конвекторов недостаток теплопритока компенсируется за счёт системы вентиляции. В подобных схемах в зданиях через систему отопления может поступать 20–25 % тепловой энергии, а через систему вентиляции — 75–80 %.

Вентиляционные установки второго типа требуют обеспечения высокой точности

Повышение энергетической эффективности в компактных ПВУ достигается путём применения роторных рекуператоров. Чувствительность к изменениям контролируемых параметров и высокая точность измерений обеспечивается за счёт применения улучшенных измерителей и алгоритмов обработки данных

и низкой инерционности регулирования подачи тепловой энергии. Следовательно, автоматическая система регулирования и управления приточно-вытяжными установками (ПВУ) должна отвечать нескольким требованиям:

1. Энергетическая эффективностью
2. Достаточная чувствительность к изменению контролируемых параметров.
3. Достаточная точность измерений.
4. Возможность проведения прогнозных расчётов спроса на тепловую энергию с учётом изменений погодных показателей на несколько часов вперёд.

Повышение энергетической эффективности в компактных приточно-вытяжных установках достигается путём применения, например, роторного рекуператора. Соответствие пп. 2 и 3 достигается за счёт применения улучшенных измерителей и алгоритмов обработки данных. Проведение краткосрочных прогнозных расчётов может быть достигнуто за счёт формирования сценарных расчётных тепловых балансов.

УДК 621.1.016. Научная специальность: 2.1.3.

Анализ перспектив развития термометров для применения в компактных приточно-вытяжных установках с роторным рекуператором

С. В. Гузов, к.т.н., доцент, кафедра тепломассообменных процессов и установок (ТМПУ), Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **А. А. Арбатский**, к.т.н., генеральный директор НИИ «Энергоэффективных технологий микроклимата»; **Е. А. Ушак**, студент, НИУ «МЭИ»; **А. О. Сорокина**, студент, НИУ «МЭИ»

Техническая целесообразность применения автоматизированных систем приточной вентиляции с рекуператором в зданиях офисного назначения является фактором, зависящим от нескольких составляющих. Помимо функциональных особенностей объекта важным является применяемый тип ограждающих конструкций. Здание с полностью светопрозрачными ограждающими конструкциями имеет существенно увеличенные тепловые и инфильтрационные потери. В статье приведён упрощённый подход по расчёту тепловых и инфильтрационных потерь для здания, расположенного в климатических условиях города Москвы. Показано, что наиболее важные для расчёта параметры измеряются с помощью термометров. Перечислены различные способы измерения температуры потока воздуха, пригодные для применения в компактных приточно-вытяжных установках с роторным рекуператором. На основе метода теории решения изобретательских задач показана комплексность и полнота применяемых методов измерения. Сделан вывод о достаточности методов измерения и о приоритетности при комплектации вентиляционных технико-экономических критериев.

Ключевые слова: общеобменная вентиляция, приточно-вытяжная установка, проектные характеристики, светопрозрачные ограждающие конструкции, тепловой баланс, тепловые потери, инфильтрационные потери, измерение температуры.

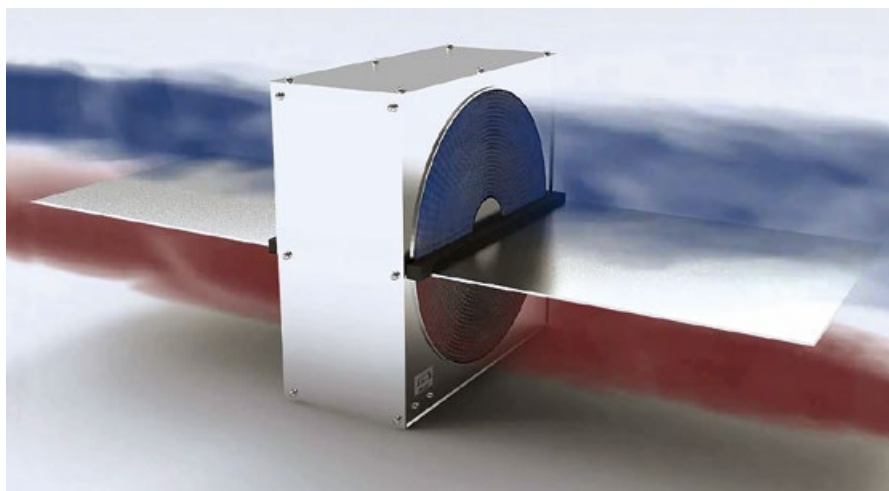
UDC 621.1.016. The number of scientific specialty: 2.1.3.

Analysis of prospects for the development of thermometers for use in compact air handling units with a rotary heat exchanger

S. V. Guzhov, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations (HMTPI), National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **A. A. Arbatsky**, PhD, General Director of the Research Institute of Energy-Efficient Technologies of Microclimate; **E. A. Ushak**, student, NRU "MPEI"; **A. O. Sorokina**, student, NRU "MPEI"

The technical feasibility of using automated supply ventilation systems with a recuperator in office buildings is a factor that depends on several components. In addition to the functional features of the object, the type of enclosing structures used is important. A building with completely translucent enclosing structures has significantly increased heat and infiltration losses compared to a building made of reinforced concrete or brick. The article presents a simplified approach to calculating heat and infiltration losses for a building located in the climatic conditions of Moscow. The simplicity of the calculations makes it possible to perform calculations with sufficient accuracy in conditions of incomplete information. It is shown that the most important parameters for calculation are measured using thermometers. Various methods for measuring air flow temperature suitable for use in compact air handling units with a rotary recuperator are listed. Based on the method of the theory of solving inventive problems, the complexity and completeness of the applied change methods is shown. A conclusion is drawn about the sufficiency of measurement methods and the priority of technical and economic criteria when completing ventilation units.

Keywords: general ventilation, supply and exhaust unit, design characteristics, translucent enclosing structures, heat balance, heat losses, infiltration losses, temperature measurement.



2. Составляющие теплового баланса

Приточная вентиляционная установка является составляющей частью системы, обеспечивающей тепловой приток. Следовательно, система будет функционировать тем точнее, чем точнее будет прогноз тепловых потерь. К ним относятся потери через ограждающие конструкции (трансмиссионные) и инфильтрационные.

Трансмиссионные потери включают потери через светопрозрачные конструкции (окна), входную группу (двери), стены, кровлю, пол и фундамент. Инфильтрационные потери возможны через окна, входную группу (двери), ограждающие конструкции (с учётом ветровой нагрузки), систему естественной вентиляции.

Для случая фасадного остекления здания существенно возрастают потери через светопрозрачные ограждающие конструкции. Для численного определения потерь данного вида необходимо выявить тип окон, которым могут соответствовать термические сопротивления (табл. 1).

Расчёт тепловых потерь через окна также потребует исходных данных:

- число дверей $n_{\text{окон}}$, ед.;

- температура внутреннего воздуха — $t_{\text{внутр.возд}}$, °C;
- расчётная температура наружного воздуха — $t_{\text{наружн.возд}}$, °C;
- длина типового окна — $l_{\text{окон}}$, м;
- высота типового окна — $h_{\text{окон}}$, м;
- год установки окон $T_{\text{окон}}$, на основании которого вычисляются возраст окна и коэффициент старения.

Возраст окна рассчитывается как:

$$T = N - T_{\text{окон}}, \quad (1)$$

здесь T — возраст окна; N — текущий год.

Коэффициент старения k лежит в диапазоне $[0; 1]$. Если здание новое, то принимается $k = 1$, если зданию 40 лет и более, то $k = 0,35$, при возрасте здания 1–40 лет коэффициент определяется по формуле:

$$k = 1 - 0,0169 T. \quad (2)$$

Расчёт тепловых потерь производится по следующей формуле:

$$\Delta Q_{\text{окон, транс}} = (t_{\text{внутр.возд}} - t_{\text{наружн.возд}}) \times (1 + 0,1) \times n_{\text{окон}} l_{\text{окон}} h_{\text{окон}} k \times \frac{1}{R_{\text{окон}}}. \quad (3)$$

Для расчёта инфильтрационных потерь используется табл. 2 и формула:

$$Q_{\text{окон, инф}} = 1,005 \times 4000 \times 2,388 \times 10^{-7} \times (t_{\text{внутр.возд}} - t_{\text{наружн.возд}}) n_{\text{окон}} \times (2 l_{\text{окон}} + 2 h_{\text{окон}}) q_{\text{окон, инф}} a_{\text{окон, притвор}}. \quad (4)$$

В случае, если на рассматриваемом объекте существует несколько типов окон или окон с разной геометрией, либо окон различного возраста, то формулу (3) необходимо применять для каждого из типов окон с последующим суммированием результатов.

Очевидно, что для онлайн-мониторинга необходима в первую очередь информация о динамично изменяющихся значениях температуры внутреннего воздуха в помещении и температуры воздуха на улице у окна. Актуальным в данном случае является вопрос о применяемом способе измерения.

3. Способы измерения температуры воздуха для АСУ системы вентиляции

Существует достаточно развитое множество термометров для измерения температур жидкостей и газов. По принципу действия можно выделить, например, жидкостные термометры [1], работающие за счёт эффекта расширения или сжатия жидкости при разных температурах. Для применения в системах вентиляции в качестве жидкости пригодны спирт и ртуть. К недостатку жидкостных термометров можно отнести медленное реагирование на изменение температуры.

Газовые термометры [2] работают аналогично жидкостным, только средой выступают инертные газы, невидимые для человеческого глаза. К недостатку газовых термометров относится необходимость применения дополнительных механизмов для снятия показаний.

Жидкостные и газовые термометры можно отнести к манометрическим термометрам [3] (при наличии дополнительных механизмов), в которых датчик измеряет давление жидкости или газа в замкнутом пространстве.

Механический термометр [4] работает по принципу температурного расширения, но вместо воды используется пружина. Стандартный механический термометр может работать в диапазоне температур $-30 \dots +60$ °C, однако этот диапазон напрямую зависит от материала и размера используемого чувствительного элемента.

Электрические термометры разделяют на термометры сопротивления [5] и термоэлектрические [6]. В термометрах сопротивления при изменении температуры изменяется активное сопротивление.

Соответствие типа окна и его термического сопротивления

табл. 1

Тип	$R_{\text{двер}}, \text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$
Деревянные окна с двойным остеклением	0,28
Стеклопакет 24 мм (4–16–4) в корпусе ПВХ	0,37
Стеклопакет 24 мм (4–16–4) в корпусе ПВХ, низкоэмиссионное покрытие	0,43
Стеклопакет 36 мм (4–10–4–14–4) в корпусе ПВХ	0,57
Стеклопакет 44 мм (4–12–4–20–4) в корпусе ПВХ	0,62
Стеклопакет 44 мм (4–12–4–20–4) в корпусе ПВХ, низкоэмиссионное покрытие	0,68

Значение удельного теплового потока

табл. 2

Тип	$a_{\text{окон, притвор}}$	$q_{\text{окон, инф}}, \text{кг} / (\text{ч} \cdot \text{м})$
Деревянные окна с двойным остеклением	0,50	5,6
Стеклопакет 24 мм (4–16–4) в корпусе ПВХ	0,33	3,8
Стеклопакет 24 мм (4–16–4) в корпусе ПВХ, низкоэмиссионное покрытие	0,33	3,8
Стеклопакет 36 мм (4–10–4–14–4) в корпусе ПВХ	0,33	2,0
Стеклопакет 44 мм (4–12–4–20–4) в корпусе ПВХ	0,33	2,0
Стеклопакет 44 мм (4–12–4–20–4) в корпусе ПВХ, низкоэмиссионное покрытие	0,33	2,0

К их преимуществам можно отнести:

- высокую точность измерений (обычно менее $\pm 1^\circ\text{C}$);
- возможность исключения влияния сопротивления линий связи на результат измерения при использовании трёх- или четырёхпроводной схемы измерений;
- практически линейная характеристика и пр.

Как недостатки следует рассматривать:

- относительной малый диапазон измерений (несущественный недостаток для систем общеобменной вентиляции);
- необходимость использования специальных схем подключения для обеспечения повышенной точности, что увеличивает стоимость внедрения;
- точность измерений может доходить до $0,00013^\circ\text{C}$, однако при существенно повышенной стоимости.

Принцип действия термоэлектрических термометров основан на свойстве металлов, сплавов и некоторых неметаллических материалов создавать термоэлектродвижущую силу при нагревании места соединения (спая) двух разнородных проводников или полупроводников. К существенному недостатку данного метода можно отнести небольшое значение создаваемой термо-ЭДС, что требует дополнительного усилителя.

Оптический термометр (пирометр) [7] измеряет инфракрасное излучение от объекта. По основному принципу действия различаются оптические и инфракрасные пирометры, работающие, соответственно, в спектре видимого света и инфракрасного излучения. Однако их применение в системах вентиляции нерационально ввиду повышенной стоимости и необходимости измерять не температуру поверхности, а температуру потока газа либо жидкости.

Помимо перечисленных выше распространённых видов термометров существуют и редко применяемые. Например, термометр Галилея [8], измеряющий температуру с помощью силы Архимеда и представляющий собой шарики разного объёма и массы, погружённые в сосуд с жидкостью. При изменении температуры (следовательно, и плотности) воды шарики изменяют глубину своего погружения. Данный способ измерения неприменим в системах вентиляции.

С точки зрения теории и практики инженерного эксперимента выделяют несколько доступных к применению физических и химических принципов. Для области энергетики — это тепло, холод, электричество, магнитное поле, звук, вибрация, свет, ядерные силы, гравитация, кинетическая энергия, сила Архимеда, сила упругости пружины или иного упру-



Рис. 1. Физико-химические принципы измерения температуры, доступные для применения в компактных приточно-вытяжных установках с роторным рекуператором

гого элемента, гидро- и пневмомеханический, химический, биологический и пр.

Каждый из перечисленных принципов может быть применён для функционирования термометров и расходомеров, применяемых в компактных приточно-вытяжных установках с роторным рекуператором. На основе доступных принципов действия составлена диаграмма полноты их использования (рис. 1).

На основе представленной классификации можно сделать вывод: в настоящее время использованы не все возможные принципы. Например, возможно использование биолюминесценции, то есть организмов, меняющих окрас от температуры окружающей среды, что для применения в установках вентиляции непрактично.

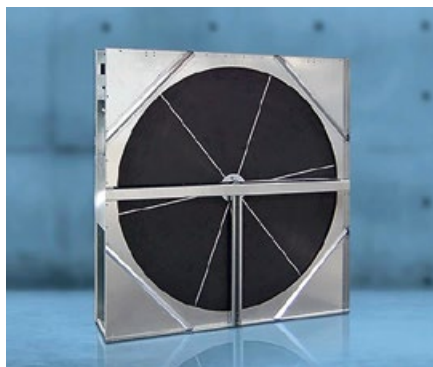
Химический принцип также возможно использовать как основу молекулярного термометра [9], работающего с веществами, между которыми проходит обратимая реакция. При изменении температуры воздуха начинает преобладать один из двух процессов — прямой или обратный, и так можно отследить изменение температуры. Ограничением будут служить чувствительность химической реакции к изменению температуры и, соответственно, скорость протекания этой реакции.

Также ведутся разработки для использования термошумового термометра [10]. Принцип его действия основан на зависимости скорости распространения зву-

ковых волн от температуры и плотности среды. Термошумовой термометр в теории мог бы подойти для измерения температуры в системах вентиляции.

Существуют также термометры, основанные на зависимости квадрупольного ядерного резонанса [11] от температуры. Однако квадрупольные термометры предназначены в основном для измерения сверхнизких температур.

Итак, можно сделать вывод о максимальной полноте физических принципов, используемых в настоящее время в компактных приточно-вытяжных установках с роторным рекуператором для измерения температуры воздушного потока и температуры жидкости. Главными критериями при выборе типов датчиков температуры будут технико-экономические параметры: компактность, удобство эксплуатации, долговечность, цена. ●



1. Принцип работы жидкостного термометра [Электр. текст]. ООО «Промснаб» от 28.02.2019. Режим доступа: prom-snab.ru. Дата обрац.: 10.06.2024.
2. Газовый термометр [Электр. текст]. «Рувикс». Режим доступа: ru.ruviki.ru. Дата обрац.: 10.06.2024.
3. Устройство манометрических термометров [Электр. текст]. «Термаркет». Режим доступа: thermarket.ru. Дата обрац.: 10.06.2024.
4. Механический термометр [Электр. текст]. «Строй-Подсказка.ру». Режим доступа: stroy-podskazka.ru. Дата обрац.: 10.06.2024.
5. Термометры сопротивления [Электр. текст]. «Строй-Подсказка.ру». Режим доступа: stroy-podskazka.ru. Дата обрац.: 10.06.2024.
6. Принцип работы термоэлектрического термометра [Электр. текст]. «Студопедия» от 10.06.2015. Режим доступа: studopedia.ru. Дата обрац.: 10.06.2024.
7. Виды и принцип действия пирометров [Электр. текст]. GEON. Режим доступа: geon.ru. Дата обрац.: 10.06.2024.
8. Термометр Галилея: история и принцип действия [Электр. текст]. «Академия Криофрост». Режим доступа: kriofofrost.academy. Дата обрац.: 10.06.2024.
9. Молекулярный термометр [Электр. текст]. «Коммерсант» от 17.08.2022. Режим доступа: kommersant.ru. Дата обрац.: 10.06.2024.
10. Термошумовой метод измерения температуры [Электр. текст]. «Киберпедия» от 09.10.2017. Режим доступа: cyberpedia.su. Дата обрац.: 10.06.2024.
11. Термометр термошумовой [Электр. текст]. «Энциклопедия по машиностроению». Режим доступа: mash-xxl.info. Дата обрац.: 10.06.2024.

References — see page 79.

Analysis of prospects for the development of thermometers for use in compact air handling units with a rotary heat exchanger. Pp. 46–48.

Sergey V. Guzhov, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations (HMTPI), National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Andrey A. Arbatsky**, PhD, General Director of the Research Institute of Energy-Efficient Technologies of Microclimate; **Evgeny A. Ushak**, student, NRU "MPEI"; **Anna O. Sorokina**, student, NRU "MPEI"

1. *Printsip raboty zhidkostnogo termometra* [Operating principle of a liquid thermometer]. OOO "Promsnab" ["Promsnab", LLC] of February 28, 2019. Web-source: prom-snab.ru. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
2. *Gazovyy termometr* [Gas thermometer]. "Ruwiki". Web-source: ruwiki.ru. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
3. *Ustrojstvo manometricheskikh termometrov: printsip dejstvija, klassifikatsija* [Design of manometric thermometers: principle of operation, classification]. "Thermarket". Web-source: thermarket.ru. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
4. *Mekhanicheskij termometr: istorija, opisanie i printsip dejstvija* [Mechanical thermometer: history, description and principle of operation]. "Stroj-Podskazka.ru". Web-source: stroy-podskazka.ru. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
5. *Termometry soprotivlenija: osobennosti, printsip dejstvija i primenenie* [Resistance thermometers: features, principle of operation and application]. "Stroj-Podskazka.ru". Web-source: stroy-podskazka.ru. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
6. *Printsip raboty termojelektricheskogo termometra* [Operating principle of a thermoelectric thermometer]. "Studopedia" of June 10, 2015. Web-source: studopedia.ru. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
7. *Vidy i printsip dejstvija pirometrov* [Types and principles of operation of pyrometers]. GEON. Web-source: geon.ru. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
8. *Termometr Galileja: istorija i printsip dejstvija* [Galileo's thermometer: history and principle of operation]. "Cryofrost Academy". Web-source: kriofrost.academy. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
9. *Molekuljarnyj termometr* [Molecular thermometer]. "Kommersant" of August 17, 2022. Web-source: kommersant.ru. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
10. *Termoshumovoj metod izmerenija temperatury* [Thermal noise method of temperature measurement]. "Cyberpedia" of October 9, 2017. Web-source: cyberpedia.su. Access date: June 10, 2024. [In Russian]
11. *Termometr termoshumovoj* [Thermal noise thermometer]. "Jentsiklopedija po mashinostroeniju" [Encyclopedia of Mechanical Engineering]. Web-source: mash-xxl.info. Access date: June 10, 2024. [In Russian]